

Herstellung und Charakterisierung von Aerogel- Faser-Verbundwerkstoffen

**Diplomarbeit
Ilyas Alman**

Referent:	Prof.Dr.-Ing. W. Ley,	FH-Aachen
Korreferent:	Prof.Dr.rer.nat. L. Ratke,	DLR Köln
Korreferentinnen:	Dr.-Ing. S. Brück, Dr. B. Milow,	DLR Köln

Juni 2006

Herstellung und Charakterisierung von Aerogel- Faser-Verbundwerkstoffen

Diplomarbeit

Verfasser: Ilyas Alman

Matrikel-Nr.: 173495

Referent: Prof.Dr.-Ing. W. Ley, FH-Aachen

Korreferent: Prof.Dr.rer.nat. L. Ratke, DLR Köln

Korreferentinnen: Dr.-Ing. S. Brück, Dr.B.Milow, DLR Köln

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln angefertigt habe.

Köln, 07.06.2006

Ilyas Alman

Aufgabenstellung

Übersicht

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist es, RF- Aerogele als Matrixwerkstoff im Hinblick auf ihren Einsatz in Verbundwerkstoffen zu untersuchen, zu beurteilen und zu optimieren. Dazu werden Lamine aus Naturfasern sowie synthetischen Fasern hergestellt und charakterisiert. Naturfaserlamine verwenden Hanf-, Jute- und Baumwoll-Garn und synthetische Lamine benutzen Kohle- und Aramidfasern als Verstärkungselemente, die mit RF-Aerogel gebunden werden. Nach der Herstellung der Lamine werden an den Proben Zug- und Biegeversuche durchgeführt, um die mechanischen Eigenschaften (Zugfestigkeit, E-Modul, Biegebruchspannung und Schubmodul) des Laminats zu bestimmen. Mit Hilfe Raster-Elektronen-Mikroskopischer und lichtmikroskopischer Aufnahmen des Verbundgefüges werden die Faserdurchtränkung sowie die Faser-Matrix-Haftung überprüft. Von der Faser-Matrix-Haftung hängt die Qualität der Faserverbundwerkstoffe ab. Des Weiteren werden die Dichten und die Faservolumenanteile der Lamine rechnerisch ermittelt.

Stichworte:

Aerogel, Aerogel-Jute-FVW, Aerogel-Baumwolle-FVW, Aerogel-Hanf-FVW, Aerogel-CFK-FVW, Aerogel-Aramid-FVW, RF-Aerogel, Faserverbundwerkstoff, Naturfaserverbundstoffe, Matrix, Laminat,

Abstract

The main goal of this thesis is to characterize and to optimize RF-aerogel as a light matrix material in fibre composites. Laminates of natural and synthetic fibres were produced and characterized. Natural fibre laminates are made of hemp-, jute- or cotton-yarn and synthetic laminates of carbon- or aramidfibres as strengthening elements embedded in RF-aerogels. After manufacturing the mechanical properties are determined by tensile and bending test of the laminate samples. With these the tensile strength, elastic modulus, bending strength and shear modulus were determined. The fibre-matrix-liability and the penetration rate of the fibre are checked by scanning-electron- and light microscopic pictures of the composite micro-structure. The quality of the reinforced fibre composites depends on the fibre-matrix-liability. The density and the fibre volume fraction are calculated.

Keywords:

aerogel, aerogel-jute-reinforced fibre composites, aerogel-cotton-reinforced fibre composites, aerogel-hemp-reinforced fibre composites, aerogel-carbon-reinforced fibre composites, aerogel-Aramid- reinforced fibre composites, RF-aerogel, fibre reinforced composites, nature reinforced fibre composites, matrix, laminate,

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
2	Stand der Technik: Faserverbundwerkstoffe und Aerogele	2
2.1	Faserverbundwerkstoffe	2
2.1.1	Verstärkungsfasern	3
2.1.1.1	Konventionelle Fasern im Bereich der Luft- und Raumfahrttechnik	3
2.1.1.2	Naturfasern	5
2.1.2	Matrixwerkstoffe	6
2.1.2.1	Konventionelle Matrixwerkstoffe in Luft- und Raumfahrttechnik	6
2.1.3	Herstellungsverfahren von Faserverbund	7
2.2	Aerogel	8
2.2.1	Herstellung von RF-Aerogel	10
2.2.2	Pyrolyse	12
3	Praktische Arbeiten	14
3.1	Herstellung der RF-Lösung	14
3.2	Herstellungsverfahren von Aerogel-Faserverbund-Werkstoff-(AFVW) Proben..	16
3.2.1	Verwendete Gewebe	18
3.3	REM- Aufnahmen der pyrolysierten Kohlefasern	21
3.4	Untersuchung der Festigkeit	22
3.4.1	Drei-Punkt-Biegung	22
3.4.1.1	Drei-Punkt-Biegung ohne Schubeinfluss	23
3.4.1.2	Drei-Punkt-Biegung mit Schubeinfluss in Laminaten	23
3.4.2	Biegebruchversuch	25
3.4.3	Zugversuch	26
3.4.4	Zugbruchversuch	26
3.5	Berechnung des Faservolumenanteils aus der Dicke	27
4	Auswertung und Diskussion der Ergebnisse	28
4.1	Ergebnisse der Drei-Punkt-Biegeversuche (3-P-B)	28
4.1.1	Reines RF- Aerogel	28
4.1.2	Naturfaserverbundstoffe	29

Inhaltsverzeichnis

4.1.3	Aramid und CFK-FVW.....	33
4.2	Ergebnisse der Zugversuche	37
4.2.1	Naturfaserverbundstoffe.....	37
4.2.2	Aramid und CFK-FVW.....	39
4.3	Auswertung der REM-Aufnahmen	40
5	Faser-Matrix-Aufnahmen.....	44
6	Diskussion und Zusammenfassung.....	47
6.1	Faserverbund mit RF-Aerogel.....	47
7	Literaturverzeichnis.....	51
	Abbildungsverzeichnis	54
8	Anhang	56
8.1	Technische Zeichnungen	56
8.2	Beispielrechnungen.....	60
8.3	3-Punkt-Biegeversuch-Werte	64
8.3.1	Biegebruchversuch.....	67
8.4	Zugversuche	68
8.5	Verwendete synthetische Fasern	71
8.6	Identifikation:	74
8.6.1	Natriumcarbonat	74
8.6.2	Formaldehyd	74
8.6.3	Resorcin.....	75
8.6.4	Wasser.....	76
	Danksagung.....	77

1. Einleitung

Die ständig steigenden Anforderungen an die Qualität und Leistungsfähigkeit von Maschinen und Produkten erfordern die Entwicklung immer leistungsfähigerer Werkstoffe mit speziellen, anwendungsorientierten Eigenschaften. Bei Faserverbundwerkstoffen (FVW) werden die hervorragenden Werkstoffeigenschaften, wie z.B. hohe Festigkeit und Steifigkeit bei sehr geringem Gewicht durch die gezielte Auswahl von Faser- und Matrixmaterialien sowie deren Kombination erreicht.

Die primäre Aufgabe der Faser innerhalb der FVW besteht darin, die in Faserrichtung angreifenden Kräfte aufzunehmen, während die Matrix die Schubkräfte zwischen den Fasern überträgt, die Fasern fixiert und diese vor Schädigung schützt.

Ein Hauptziel heutiger Werkstoffentwicklung ist die Reduktion der spezifischen Dichte unter Beibehaltung oder Verbesserung der mechanischen Eigenschaften. Faserverstärkter Kunststoff sind in der Lage, diese komplexen Forderungen weitgehend zu erfüllen, da die Materialeigenschaften gezielt an die Belastung angepasst werden können. Einsatzgebiete von FVW sind hauptsächlich Strukturen in der Luftfahrt, wie z.B. Flugzeugrümpfe, Seitenleitwerke und Höhenleitwerke.

Zurzeit rückt eine weitere Forderung in den Vordergrund: Umweltverträglichkeit bei der Herstellung, im Gebrauch und insbesondere bei der Entsorgung. Auf diesem Gebiet sind die Eigenschaften moderner Hochleistungsverstärkungsfasern wie Glas-, Aramid- oder Kohlenstofffaser umstritten.

Naturfasern bieten aufgrund geringer Dichte, guter mechanischer Eigenschaften, unbegrenzter Verfügbarkeit und problemloser CO₂-neutraler Entsorgung eine echte Alternative zu heutigen technischen Verstärkungsfasern. Die spezifischen mechanischen Eigenschaften können mit denen der Glasfaser konkurrieren.

In dieser Arbeit wird ein neuer Matrixwerkstoff zur Untersuchung mit verschiedenen Fasersorten überprüft, ausgewertet sowie die Verträglichkeit hinsichtlich ihrer Haftung auf die unterschiedlichen Fasersorten bewertet.

Der neue Matrixwerkstoff heißt RF- Aerogel. Er kann eine Dichte von bis zu 0.4 [g/cm³] haben und ist etwa 300-mal schwerer als Luft ($\rho_{\text{Luft}} = 0.0012$ [g/cm³]). Diese geringe Dichte hat den Vorteil wesentlich leichter als die heutigen gebräuchlichen Matrixwerkstoffe wie Epoxyd-, Vinylester- und Polyesterharze zu sein, deren Dichten sich in einem Bereich von 1.17 bis 1.25 [g/cm³] bewegen.

Das besondere an RF-Aerogelen als Matrixwerkstoff ist, dass sie organisch sind und somit beim Einsatz mit Naturfasern als Hochleistungsverstärkungsfasern das Endprodukt komplett organisch und vollständig biologisch abbaubar ist.

2 Stand der Technik: Faserverbundwerkstoffe und Aerogele

2.1 Faserverbundwerkstoffe

Ein **Faserverbundwerkstoff** besteht aus einem **Matrixwerkstoff**, wie beispielsweise Kunststoff, Epoxydharz oder auch Beton, und den darin eingebetteten **Verstärkungsfasern**.

Um die Stoffeigenschaften der Fasern nutzen zu können, müssen diese in die Matrix eingebettet werden [2, 12]. Aufgaben des Matrixwerkstoffes sind dabei die Übertragung und Verteilung der auftretenden Kräfte, die Fixierung der Fasern und deren Abschirmung gegen eventuell aggressive Umgebungsmedien. Es werden vor allem die Eigenschaften der Fasern in Längsrichtung genutzt. Moderne Industriefasern, wie beispielsweise Kohlenstoff-, Glas- oder Aramidfasern besitzen sehr gute mechanische Eigenschaften (Festigkeit, Steifigkeit). Es können jedoch je nach Anwendung auch Naturfasern eingesetzt werden beispielsweise Hanf- und Baumwollfasern [12].

Ist der Faserverbundwerkstoff schichtweise (beispielsweise aus mehreren Fasermatten übereinander) aufgebaut, so wird der Verbund als Laminat bezeichnet [4]. Vorteile des Laminats sind eine hohe Festigkeit bei gleichzeitig geringem Gewicht und die einfache Verarbeitung. Daher wird er häufig im Leichtbau verwendet [3]. Bei Laminaten können die Fasern je nach Belastung des Bauteils ausgerichtet werden. Somit ist es möglich einen Werkstoff zu konstruieren, der genau auf den Anwendungsfall ausgerichtet ist. An höher belasteten Stellen werden, ähnlich wie bei Pflanzen, mehr Fasern genau in Kraftrichtung angeordnet [2, 12].

Es ist bekannt, dass in einem Faserverbund die Verstärkungsfasern den überwiegenden Teil der Last tragen, das heißt es muss im Verbund gewährleistet sein, dass die Fasern bis zu ihrer Bruchdehnung gestreckt werden können. Besitzt die Matrix eine geringere Bruchdehnung als die Faser, so führt das Brechen der Matrix beim Erreichen ihrer Bruchdehnung zu Faserrissen, was in einem vorzeitigen Schaden des Verbunds resultiert [2]. Daher sollte bei der Auswahl der einzelnen Komponenten für einen Faserverbund stets darauf geachtet werden, dass die Matrix-Bruchdehnung größer ist als die der Faser. Dies gilt insbesondere bei tiefen Temperaturen, wenn der Matrixwerkstoff aus Epoxydharz, Vinylesterharz oder Phenolharz besteht und dabei versprödet und ihre Bruchdehnung abnimmt [3].

Stand der Technik

Faserverbundwerkstoffe umgeben uns in allen Lebensbereichen, meist ohne dass wir uns dessen bewusst sind. Das Spektrum reicht von Kleidern, Möbeln, Haushaltsgeräten bis hin zu mehrstöckigen Bauwerken, Brücken und der Raumfahrt. Man bedenke, dass Holz auch ein Faserverbundwerkstoff ist. Überall wo es sich wirtschaftlich lohnt und die Umgebung (Chemische Bedingungen, Temperatur, Feuchtigkeit) es zulässt, ist die Verführung groß, elegant, präzise, ökonomische und künstlich hergestellte Mehrphasensysteme einzusetzen [2, 3, 4].



Abbildung 2.1: Rumpf aus Kohlefaser (Quelle: Boeing).



Abbildung 2.2: Vordere Rumpfschiffung aus Kohlefaser.



Abbildung 2.3: Aramidfaser-Einlage im Fahrradreifen.



Abbildung 2.4: Flugzeugnase (Radome) aus Glasfaser.

2.1.1 Verstärkungsfasern

2.1.1.1 Konventionelle Fasern im Bereich der Luft- und Raumfahrttechnik

Die am häufigsten eingesetzten Verstärkungsfasern sind:

- Glasfaser
- Kohlenstofffaser
- Aramidfaser (Kevlar)

Glasfaser

Glasfasern sind die gebräuchlichsten Verstärkungsfasern für Faserverbundwerkstoffe. Sie sind preisgünstig (2-6 €/kg) und besitzen ausgezeichnete mechanische (Biegebruchspannung ≤ 810 MPa), thermische (temperaturbeständig bis 400 °C), dielektrische und chemische Eigenschaften. Die Festigkeiten ($R_m \approx 1625$ MPa) sind sehr groß und entsprechen denen von Metallen (z.B. 30 CrMoV 9), wobei das spezifische Gewicht ($\rho = 2.5\text{--}2.6$ g/cm³) niedriger ist. Die Steifigkeit (E-Modul = 73–86 GPa) von Glasfaser ist gegenüber vielen Metallen relativ niedrig, so dass bei einer steifigkeitsbezogenen Auslegung von Bauteilen durch die benötigte größere Wandstärke der Gewichts-vorteil aufgehoben wird [20].

Kohlenstofffaser

Kohlenstofffasern weisen eine hohe Festigkeit ($R_m \approx 3000\text{--}5000\text{ MPa}$) und bedeutend höhere Steifigkeit ($E\text{-Modul} = 120\text{--}650\text{ GPa}$) auf als Glasfasern (Abb. 2.5). Das spezifische Gewicht von Kohlefaser ($\rho = 1.6\text{--}1.8\text{ g/cm}^3$) ist etwas niedriger. Die Dauerfestigkeit bei dynamischer Belastung ist gut, die Hitzebeständigkeit von Kohlefasern selbst ist sehr gut und liegt bei 1000°C . Die Wärmeausdehnungen von Laminaten sind wegen des negativen Ausdehnungskoeffizienten der Kohlefasern sehr gering. Wegen der höheren Schlagempfindlichkeit von Kohlefaser sollten sie bei erhöhter Schlagbeanspruchung nicht eingesetzt werden. Kohlefasern zeigen eine gute Strahlendurchlässigkeit (z.B. Röntgenstrahlen) und sind elektrisch leitend. Kohlefaser in Verbund mit einem Matrixwerkstoff werden als **CFK** (Carbonfaserkunststoff) bezeichnet.

Aramidfaser

Der Einsatz von Aramiden ist dann sinnvoll, wenn Gewichtsersparnis ($\rho = 1.4\text{--}1.45\text{ g/cm}^3$) an erster Stelle steht (Abb. 2.5). Weiterhin werden abrieb- und schlagbeanspruchte Teile (z.B. Schutz der Vorderkanten von Flugzeugleitwerken gegen Hagelschlag) aus aramidfaserverstärkten Kunststoffen gefertigt. Die Festigkeit ($R_m \approx 2800\text{--}3000\text{ MPa}$) und Steifigkeit ($E\text{-Modul} = 70000\text{--}120000\text{ MPa}$) der Aramidfasern sind etwas besser als bei Glasfasern [21]. Weitere Eigenschaften sind das gute Dämpfungsvermögen, die Nicht-entflammbarkeit und die hervorragende chemische Beständigkeit. Die Wärmebeständigkeit (temp.best. $\leq 120^\circ\text{C}$) von AFK (Aramidfaserkunststoff) ist verglichen mit GFK (Glasfaser-kunststoff) und CFK wesentlich geringer. Die Bearbeitung von Laminaten ist wegen der hohen Zähigkeit der Faser sehr schwierig. Zum Schneiden von Geweben sind Spezialwerkzeuge wie mikroverzahnte Scheren erforderlich. Für technische Lamine, z.B. im Fahrzeug- und Flugzeugbau, wird hauptsächlich die **Hochmodulfaser Kevlar® 49** oder **Twaron® HM** eingesetzt. **Niedermodul-Aramidfasern** (Kevlar® 29, Twaron® LM) besitzen ein hohes Arbeitsaufnahmevermögen (Abb. 2.6) und werden überwiegend für ballistische Hartlamine sowie Splitter- und Kugelschutzwesten verwendet. Aramidfaserverbundwerkstoffe werden als **SFK** (Synthesefaserkunststoff) oder AFK (Aramidfaserverstärkterkunststoff) bezeichnet.

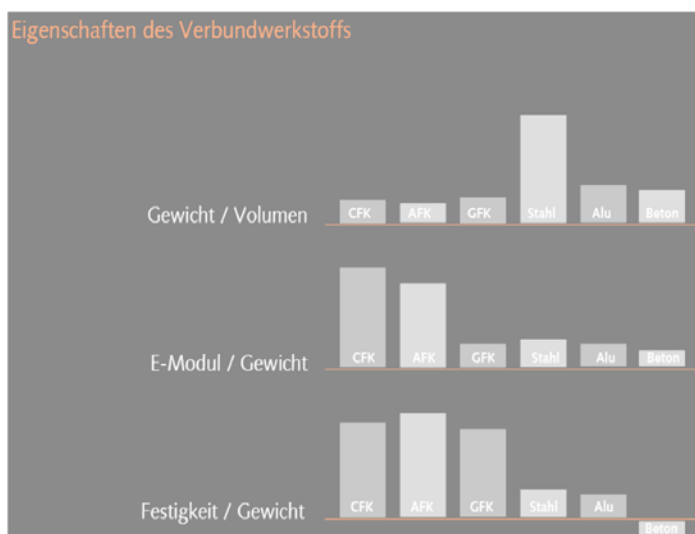


Abbildung 2.5: Kennwerte der Fasern [15].

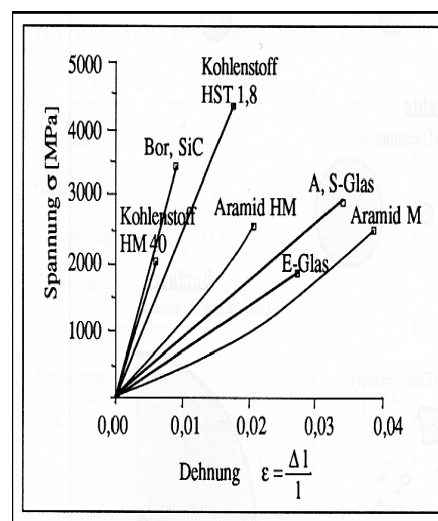


Abbildung 2.6: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Fasern [15].

Zusammenfassung der Eigenschaften

Kohlenstofffasern sind in ihren Eigenschaften den Aramid- und Glasfasern sehr überlegen. Deshalb werden Kohlenstofffasern bevorzugt im Bereich der Luft- und Raumfahrttechnik eingesetzt (Abb. 2.1-2.2). Die anderen Verstärkungsfasern finden in Gebieten Einsatz, die spezielle Materialeigenschaften erfordern. Ein Beispiel dafür ist die bereits erwähnte Flugzeugnase (Radome) aus Glasfaser (Abb. 2.4). Durch den Einsatz von GFK wird gewährleistet, dass das Radargerät ungestört, d.h. ohne reflektiert zu werden, seine Signale ausstrahlen kann, was bei anderen Fasern nicht möglich ist. Trotz des Vorteils von Kohle-faser hinsichtlich der Materialeigenschaften muss man gegenüber den anderen Verstärkungsfasern den Preis von 10-105 €/kg berücksichtigen. Der Einsatz von Kohlefaser ist im Vergleich zu anderen Fasern sehr teuer und in der Regel ist der Preis ein maßgebender Punkt beim Konstruieren [7, 21].

2.1.1.2 Naturfasern

BAUMWOLLE

Baumwolle ist besonders reiß- und scheuerfest (siehe Abb. 2,7-2,8). Die Reißfestigkeit liegt bei 450MPa. Es ist sehr saugfähig, weich im Griff, matt und nicht sehr elastisch ($E=11$ GPa). Sie ist gut verspinnbar und kann mit allen Fasern gemischt werden. Baumwolle lässt sich sehr gut bleichen und färben. Baumwolle kann bis zu 65% ihres Gewichtes an Wasser aufnehmen, ohne zu tropfen, daher werden Handtücher hauptsächlich aus Baumwolle gefertigt. Sportbekleidung aus Baumwolle: der Schweiß kann gut aufgesaugt werden. Baumwolle verbrennt rasch, hell und glüht nach. Es riecht nach verbranntem Papier [21].

HANF

Hanffasern haben eine sehr hohe Festigkeit (Reißfestigkeit=1110 MPa) und sind dazu sehr leicht ($\rho=1,47\text{g/cm}^3$). Deshalb werden daraus hauptsächlich Seile und Schnüre gefertigt. Die Fasern sind grob und hart. Hanf lässt sich schwer färben und wird daher häufig ungefärbt oder mit Naturfarben eingefärbt angeboten. Die Hanfpflanze ist sehr vielseitig. Öle, Salben, Papier, Dämmschutz, Textilien und Schnüre werden unter anderem aus Hanf hergestellt. Die Pflanze ist sehr anspruchslos, so dass sie auf fast jedem Boden ohne Düngung und Schädlingsbekämpfung wächst [21].

JUTE

Jutefasern sind stark verholzt und ungleichmäßig. Sie haben einen starken Geruch und sind fäulnisanfällig. Jutefasern lassen sich gut färben [21].

Kennwerte der Naturfasern [21].

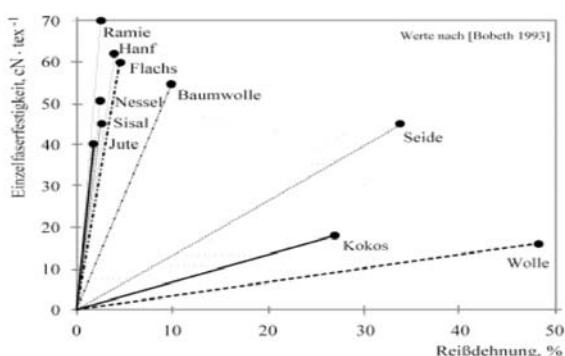


Abbildung 2.7: Festigkeitswerte der Naturfasern.

	Baumwolle	Hanf	Jute
Faserbreite Zelle [μm]	12-42	16-50	16-21
Dichte [g/cm^3]	1,52	1,47	1,49
E- Modul [GPa]	11	90	45
Zugfestigkeit [MPa]	450	1110	540

Tabelle 1: Kennwerte der Naturfasern.

2.1.2 Matrixwerkstoffe

2.1.2.1 Konventionelle Matrixwerkstoffe in Luft- und Raumfahrttechnik

- Epoxydharze
- Polyesterharze (ungesättigt)
- Vinylesterharze

Epoxydharze

EP-Harze zeichnen sich durch eine hohe Haftfestigkeit an den Verstärkungsfasern bzw. Einlagen und einen geringen Härtungsschwund aus. Epoxyde weisen im Bereich der Laugen meist eine bessere Beständigkeit auf als andere Harze wie zum Beispiel Polyesterharze. Sie sind, je nach Typ, auch gegen eine Reihe von Säuren und Lösungsmitteln beständig, unter anderem gegen Petroleum, Diesel- und Heizöl.

Polyesterharze(UP)

UP-Harze zeichnen sich verglichen mit Epoxydharzen durch ihre Kostengünstigkeit aus. Sie besitzen eine sehr gute UV- und Chemikalienbeständigkeit und haben eine sehr geringe Wasseraufnahme, die im Bereich des Schiffbaus sehr von Vorteil ist. Allerdings besitzen sie nur eine geringe Festigkeit und haben einen großen Härtungsschwund mit niedriger Glasübergangstemperatur.

Vinylesterharze

Vinylesterharze stehen chemisch gesehen zwischen UP- und EP-Harzen. Sie bieten eine gute Haftung auf Glasfasern und sind darüber hinaus auch sehr duktil. Sie eignen sich somit zum Nachverformen von Bauteilen. Vinylesterharze werden wegen ihrer sehr guten Beständigkeit gegenüber vielen Chemikalien in letzter Zeit verstärkt im Bootsbau verwendet.

Die sehr guten mechanischen Eigenschaften, insbesondere die hohe Bruchdehnung und die guten thermischen Eigenschaften sind hervorzuheben. Aus den genannten Gründen finden sie u.a. Verwendung in Carbon- und Aramidfaserlaminaten.

Harze	Dichte g/cm ³	Zugfestigkeit GPa	E-Modul GPa	Bruchdehnung %
EP Epoxydharze	1,1-1,25	70-90	2,8-6,0	6-8
UP ungesättigte Polyesterharze	1,12-1,25	50-70	3,5-5,0	≤ 3
VE Vinylesterharze	1,07	75-85	3,4-3,8	3,5-7

Tabelle 2: Kennwerte der Harze [19].

Zusammenfassung der Eigenschaften der Matrixwerkstoffe

Epoxydharze zeigen auf allen für die Luft- und Raumfahrttechnik wichtigen Gebieten deutlich bessere Eigenschaften als Polyester- oder Vinylharze. Sie haften besser, sind mechanisch stabiler, schrumpfen weniger bei der Aushärtung und sind beständiger gegen Wasser. Epoxydharze sind teurer als die beiden anderen Harztypen und härten langsamer aus (= längere Arbeitszeiten). Angesichts der deutlichen Vorteile in ihren Eigenschaften und des geringeren Harzanteils im Laminat im Vergleich zu einem Polyesterlaminat ist der Aufpreis für das fertige Produkt jedoch verschwindend klein. Mit einem, aus hochwertigen Epoxydharzen gebautem Produkt, erhält man eine stabile und leichte Konstruktion mit langer Lebensdauer.

2.1.3 Herstellungsverfahren von Faserverbund

Handlegeverfahren (Laminieren)

Die Faserhalbzeuge (Gewebe / Gelege / Fasermatten) werden von Hand auf eine Form drapiert und mit Harz getränkt. Anschließend werden sie mit Hilfe einer Rolle durch Anpressen entlüftet. Dadurch soll nicht nur die im Laminataufbau vorhandene Luft, sondern auch überschüssiges Harz entfernt werden. Dieses Vorgehen wird so oft wiederholt bis die gewünschte Schichtstärke vorhanden ist. Man spricht auch von einem "Nass in Nass" Verfahren. Nach dem Aufbringen aller Schichten härtet das Bauteil durch die chemische Reaktion des Harzes mit dem Härter aus. Das Verfahren stellt keine großen Ansprüche an die Werkzeuge und ist auch für sehr große Bauteile geeignet. Es wird oft im Serienbau eingesetzt, wo zwar leichte Bauteile erwünscht sind, aber auch kostengünstig produziert werden soll [20].

Dem Vorteil eines geringen Werkzeug- und Ausstattungsaufwand, stehen die geringere Bauteilqualität (geringerer Fasergehalt) und der hohe manuelle Aufwand, der geschulte Laminierer voraussetzt, gegenüber. Die offene Verarbeitung des Harzes stellt hohe Ansprüche an den Arbeitsschutz.

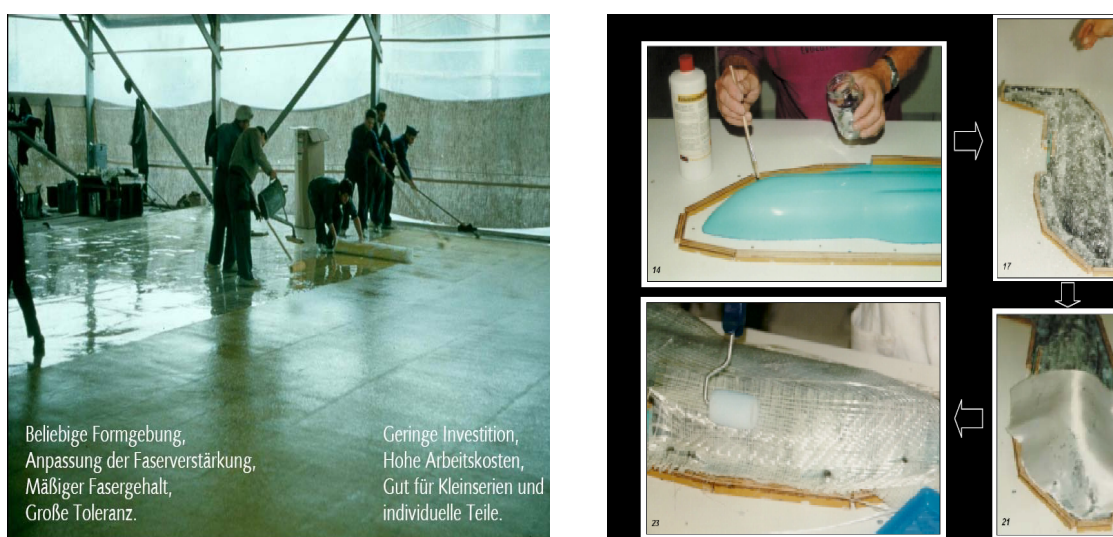


Abbildung 2.8: Handlegeverfahren von Laminaten [15].

2.2 Aerogel

Grundlagen

Aerogele sind hochporöse nanostrukturierte Werkstoffe mit extrem kleinen Dichten, die üblicherweise im Bereich zwischen 0.03 und 0.3 [g/cm³] liegen. In einigen Laboren konnten Werte von bis zu 0.01 g/cm³ erreicht werden ($\rho_{\text{Luft}, 20^\circ\text{C}} = 0.001204 \text{ g/cm}^3$). Die Porengrößen liegen bei Aerogelen in der Größenordnung von 3 – 30 nm. Diese können zu 99% aus Luftkanälen bestehen, woraus eine extrem große innere Oberfläche resultiert, die bei einem Quader von 1 Gramm Gewicht mehr als 1000 m² umfassen kann.

Das klassische Herstellungsverfahren für Aerogele, wie es bereits seit ihrer Entdeckung vor über 60 Jahren eingesetzt wird, geht von einem so genannten Sol-Gel-Prozeß aus, bei dem aus einer flüssigen Stoffmischung (Sol) ein amorphes Festkörper-Netzwerk (Gel) wächst. In das so entstandene Gel-Gerüst ist noch Flüssigkeit eingelagert, die anschließend im so genannten überkritischen Zustand, also unter hohem Druck und bei hoher Temperatur, extrahiert wird. Dabei bleibt die Struktur des Gels erhalten.

Nachdem auch die Herstellung organischer Aerogele gelungen ist, die im Vergleich zu den keramischen weniger spröde sind und weiter verbesserte Wärmedämmeigenschaften besitzen, ist ihr Einsatz in zusätzlichen industriellen Anwendungen denkbarer geworden. Außerdem können sie durch Erhitzung unter Luftabschluss (Pyrolyse) in reine Kohlenstoff-Aerogele überführt werden, die elektrisch leitfähig sind.

Praktisch alle Anwendungsmöglichkeiten für Aerogele beruhen auf ihrer hochporösen Nanostruktur. Diese ist verantwortlich für Eigenschaften wie die geringe akustische Impedanz und die kleine Wärmeleitfähigkeit, sowie für den niedrigen Brechungsindex. Der Elastizitätsmodul bewegt sich in einem Bereich von 0,002 bis 100 MPa, mit einem typischen Wert von 1 MPa. Aerogele können im Normalfall mehr als das 2000-fache ihres Eigengewichtes an Auflast tragen. In einigen Einsatzfällen ist auch die hohe optische Transparenz einiger Aerogele wie Silica- Aerogele von Nutzen.

Aufgrund ihrer großen spezifischen Oberfläche und des geringen Gewichtes haben die Aerogele ein enormes Anwendungspotential. Speziell für die Luft- und Raumfahrttechnik bietet sich ihre Nutzung als leichter Matrixwerkstoff für die Faserverbundwerkstoffe an.

Eine Schwachstelle von Aerogelen bildet ihre relativ hohe Empfindlichkeit gegenüber Umwelteinflüssen. So sind Siliziumdioxid- Aerogele insbesondere vor Feuchtigkeit zu schützen, da ihr Gerüst aufgrund ihrer chemischen Struktur wasseraufnehmend ist.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die teilweise bereits erfolgreichen Bemühungen um ein tiefgehendes Verständnis ihrer Struktur und die Verbesserung ihrer Eigenschaften in Zukunft zu einer stärkeren Verbreitung der bisher noch relativ unbekannten Werkstoffgruppe der Aerogele führen wird [1].

Herstellung

Synthese nach Kistler

Aerogele werden hergestellt, indem ein Gel aus einem gallertartigem Stoff unter extremen Bedingungen getrocknet wird. Die erstmalige Synthese von Silikat-Aerogelen gelang Steven Kistler in den Jahren 1931/32. Er entwickelte als Erster eine Methode um Gele zu trocknen, ohne dass diese dabei eine Schrumpfung aufwiesen [1, 5, 6, 9].

Kistler nutzte Natriumsilicat, das er mit Wasser vermischte und so eine Lösung herstellte. Nach der Zugabe der als Katalysator wirkenden Salzsäure fielen mit der Zeit Teilchen aus, welche sich durch die Molekularbewegung unkoordiniert in der Lösung verteilten und dabei auch zusammenstießen. Durch die allmähliche Haftung aggregierten sich diese Teilchen mit der Zeit und binnen ungefähr eines Tages resultierte ein Gel mit netzwerkartiger Struktur. Aus diesem wurden die Säurereste mit Wasser ausgespült und es folgte eine Versetzung mit Alkohol. Dieser Schritt ist notwendig, da das Wasser ansonsten im weiteren Prozessverlauf die Gelstruktur wieder zerstören würde. Verdunstet der Alkohol langsam, so bilden sich aufgrund der wirkenden Oberflächenkräfte Menisken. Die weitere Trocknung führt zu Rissbildung in der Oberfläche (Abb. 2.11). Damit verbunden wäre eine Schrumpfung des Gels und als Ergebnis ein poröses Gefüge mit ungefähr 50 % Porenanteil, was es jedoch gerade zu vermeiden galt. Kistler erhöhte zur Trocknung Temperatur und Druck über den kritischen Punkt (Abb. 2.8), so dass ein überkritisches Fluid entstand. Diese Vorgehensweise wird als überkritische Trocknung bezeichnet. Die Oberflächenkräfte, welche im anderen Fall zur Bildung von Menisken geführt hätten, existierten nicht mehr. Das überkritische Fluid wurde dann aus dem Autoklaven abgeblasen, wodurch das Produkt trocknete und schließlich zum Aerogel geworden war. Dabei hatte das Aerogel die Größe und Form des ursprünglichen Gels behalten, wobei die von Kistler hergestellten Silikat-Aerogele eine Dichte von rund 30 bis 300 kg/m³ und eine Porösität im Bereich zwischen 86 und 98 % aufwiesen.

Überkritische Trocknung

Die **überkritische Trocknung** ist ein Verfahren zur kontrollierten und präzisen Abtrennung von Flüssigkeiten aus Feststoffen. Wie bei der Gefriertrocknung wird dabei das Phasenverhalten eines Stoffes ausgenutzt, um die Trocknung mittels Verdampfung zu umgehen. Der Ausdruck **überkritisch** bezieht sich dabei auf die Druck- und Temperaturbedingungen, die im Verfahren oberhalb des kritischen Punktes liegen (Abb. 2.10).

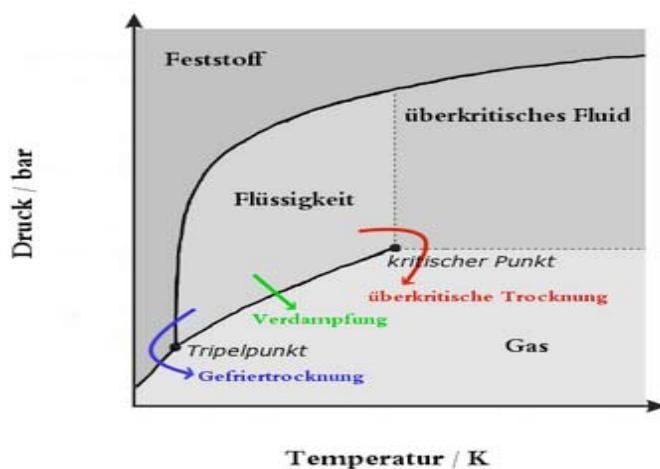


Abbildung 2.9: Darstellung der verschiedenen Übergangsphasen.

Trocknung

Lässt man das Lösungsmittel bei Raumtemperatur verdunsten bzw. im Trockenschrank verdampfen, so kommt es zu einer Reihe von Effekten, die sich bei sehr fein strukturierten Materialien als problematisch erweisen. Das Lösungsmittel fängt an der Oberfläche an zu verdunsten und führt dabei insbesondere bei Gelen zu einer dem Volumen der Lösungsmittel entsprechenden Schrumpfung. Gleichzeitig strömt Lösungsmittel aus dem Inneren des Körpers nach. Es kommt zu einer Verformung der labilen Feinstrukturen und im Extremfall führt der wirkende Druckgradient zu Rissen im Material. Ist das Netzwerk schließlich zu steif, um weiter zu schrumpfen, fangen die Poren an sich zu entleeren, wobei immer die größten Poren beginnen. Je größer die Porenradien und je geringer ihre Unterschiede dabei sind, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit einer Zerstörung der Feinstruktur. Bei geschlossenen Poren wirken Diffusionsprozesse. Der Flüssigkeitsfilm an den Wänden der Poren bleibt am längsten bestehen. Resultat eines solchen Prozesses ist im Fall eines Gels ein Xerogel [5].

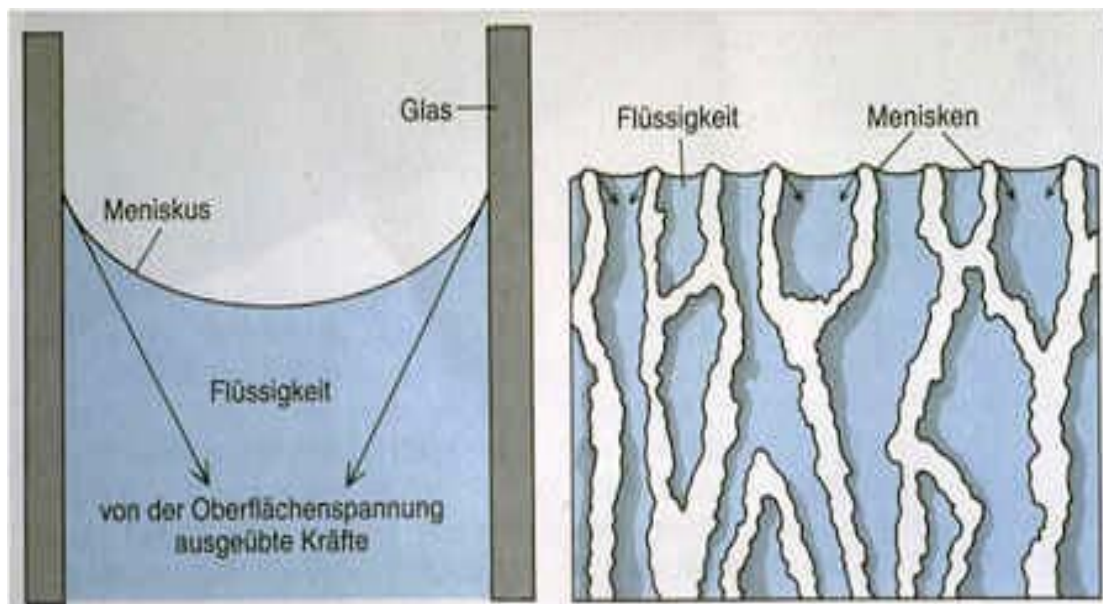


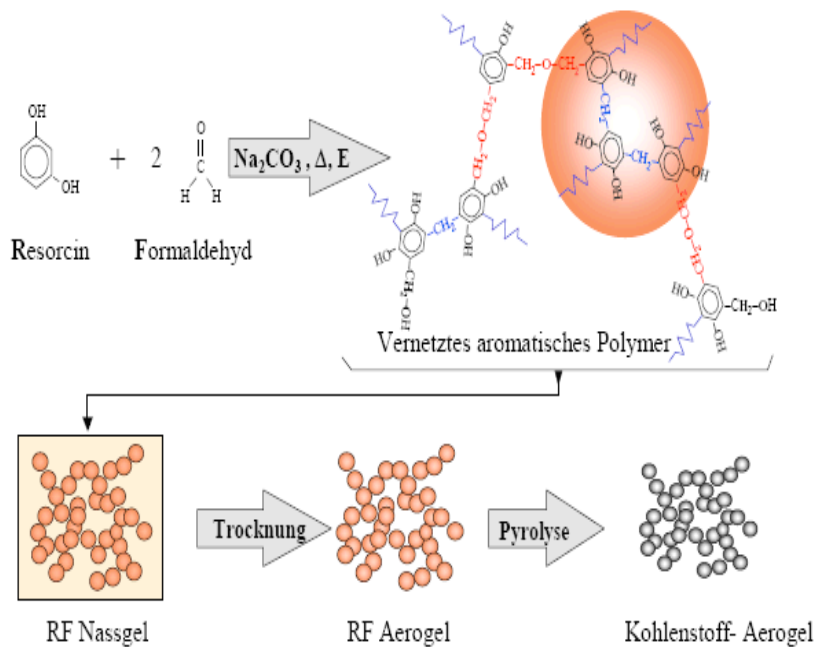
Abbildung 2.10: Oberflächenspannungen beim Trocknen an der Luft [5].

2.2.1 Herstellung von RF-Aerogel

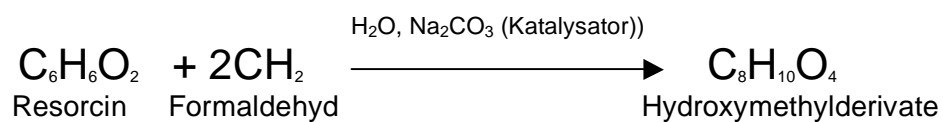
Schritte:

1. Reaktion zwischen Resorcin und Formaldehyd die zum Teilchen-Wachstum führen.
2. Vernetzungsreaktion der Teilchen zum Gel.
3. Trocknung (im Trockenschrank): Bildung des Aerogels.
4. Pyrolyse: Überführung zum Kohlenstoff – Aerogel (Abb.2.14).

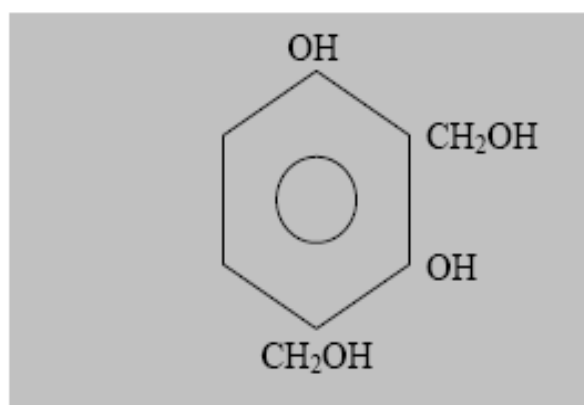
Reaktionen bis zum RF-Aerogel [14]



Reaktionsgleichung



Strukturformel des Hydroxymethylderivats



Einfluss des Katalysators:

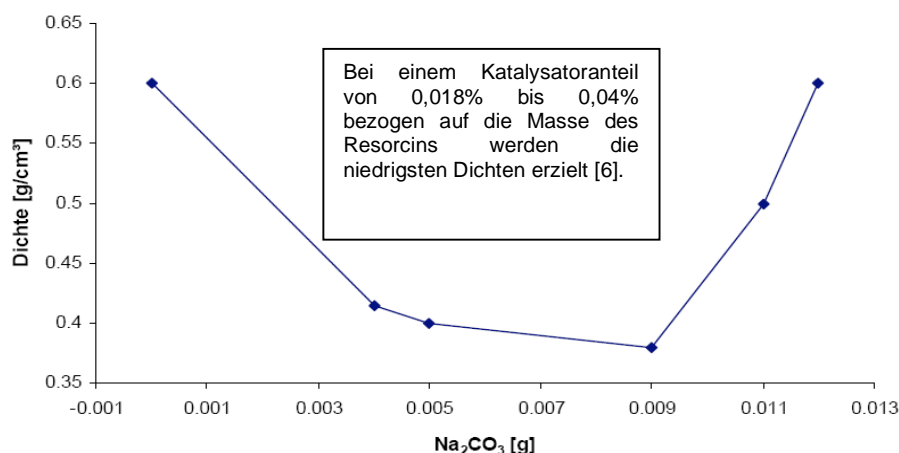


Abbildung 2.11: Einfluss der Katalysatoranteile auf die Dichte [6].

2.2.2 Pyrolyse

Pyrolyse ist die Bezeichnung für die thermische Spaltung chemischer Verbindungen, wobei durch hohe Temperaturen ein Bindungsbruch innerhalb von großen Molekülen erzwungen wird. Dies geschieht unter Sauerstoffausschluss, um die Verbrennung zu verhindern. Dieser Prozess wird auch als Verschwelung bezeichnet.

Bei diesem Prozess zur thermischen Zersetzung kohlenstoffhaltiger Werkstoffe unter Ausschluss von Sauerstoff bei Temperaturen um 500 °C (Niedertemperaturpyrolyse) bzw. 700 bis 1800 °C (Hochtemperaturpyrolyse), entsteht als Rückstandsprodukt Pyrolysekoks.

Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass Elemente abgespalten werden, die nur Zusatzlast darstellen, ohne dass sie, chemisch gesehen, am Ausgangsprodukt beteiligt sind. Ein Beispiel hierfür ist Wasser, hierdurch wird auch das Produkt wesentlich leichter, was von großem Vorteil ist.

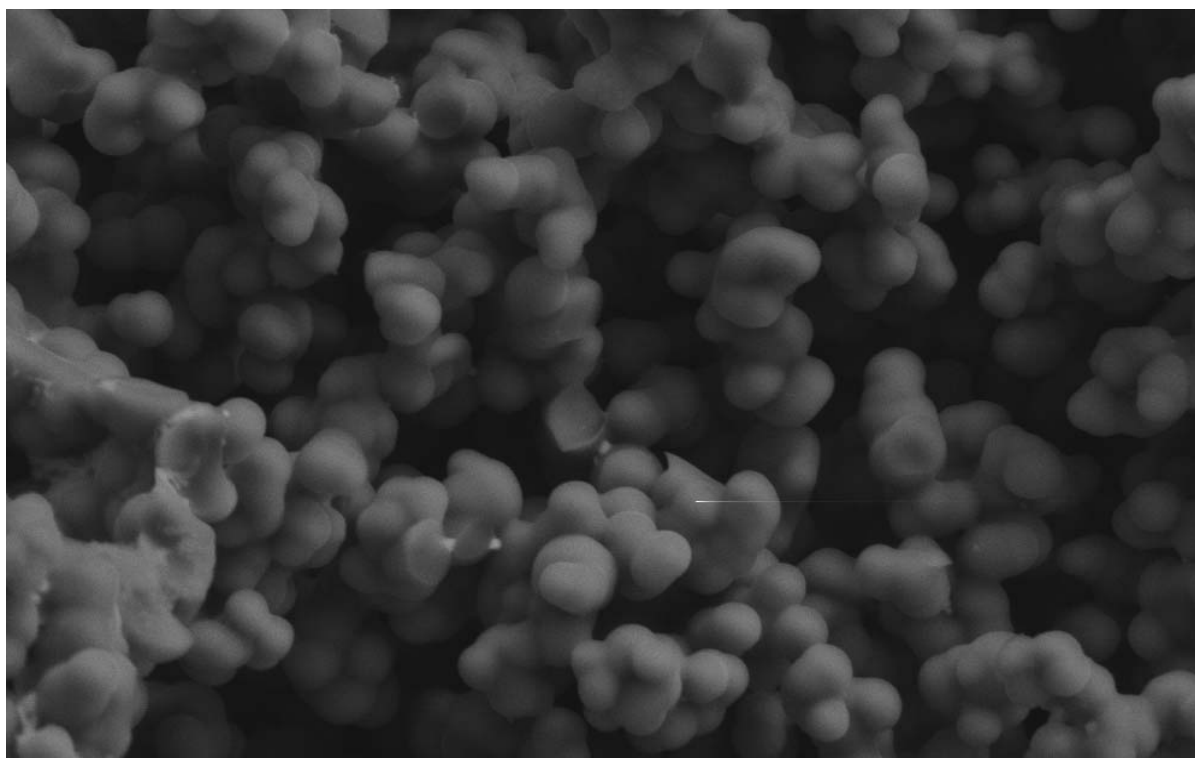
Die Pyrolyse bewirkt, dass die Proben (reiner Pyrolysekoks) elektrisch leitend sind und dadurch unter dem Rasterelektronenmikroskop sichtbar werden.


Pyrolyseofen



Abbildung 2.12: Pyrolyseofen F150 500/13 der Firma Gero.

Stand der Technik



Mag = 5.00 K X 

3 μ m

EHT = 10.00 kV
WD = 12 mm

Signal A = MPSE
Photo No. = 2752

Date : 6 Apr 2006
Time : 12:09:12

Abbildung 2.13: REM- Aufnahme eines Kohlenstoff-Aerogels.

3 Praktische Arbeiten

3.1 Herstellung der RF-Lösung

Die Herstellung von Resorcin Formaldehyd- Aerogel setzt sich zusammen aus Resorcin, Formaldehyd, Wasser und Natriumcarbonat.

Die Bestandteile Resorcin, Formaldehyd und Natriumcarbonat als Katalysator werden in deionisiertem Wasser gelöst.

Die Reihenfolge für die Mischung ist folgendermaßen [5, 6, 9]:

1. 328 ml Wasser (deionisiert)
2. 88g Resorcin
3. 80ml 37% Formaldehyd(VWR) – Lösung
4. 0,056g Natriumcarbonat (Katalysator)

Zunächst wird das Resorcin im deionisierten Wasser vollständig gelöst. Anschließend wird die wässrige Formaldehydlösung zugegeben. Zum Schluss wird der Katalysator zur Lösung gegeben. Die RF-Lösung wird unter dem Abzug in einem Becherglas (600ml) bei Raum-Temperatur solange ständig gerührt bis die Lösung gelblichklar ist [6, 9].

Bei der Herstellung der Resorcin Formaldehyd – Aerogele (organische Aerogele) müssen die Sicherheitsbestimmungen eingehalten werden. Die Arbeitsplatzkonzentration von Formaldehyd wird mit Hilfe geeigneter Detektionsmittel geprüft. Dazu wird ein Passiv-sammler, der auf dem Prinzip der Gasdiffusion (GASTEC Passivsammler) beruht, zur Messung der Tagesdosis eingesetzt. Zur Messung der Momentankonzentration wird ein Probenamenpumpensystem (GASTEC) verwendet. In beiden Fällen konnte keine Überschreitung der Grenzwerte (MAK: 0,5ppm) festgestellt werden. Die Überprüfung der Arbeitsplatzkonzentrationen ist notwendig, da der unsachgemäße Umgang mit Formaldehyd gesundheitsschädlich ist [11].

Die Menge des Natriumcarbonats, das als Katalysator eingesetzt wird, muss sehr genau abgemessen sein, weil die Bildung der kolloiden Teilchen und Teilchenaggregate und schließlich das Gelieren stark von der Natriumcarbonat (Na_2CO_3)- Konzentration abhängt (Abb. 2.12) [9].



Abbildung 3.1: Verwendete Chemikalien: 1:Natriumcarbonat (Soda), 2: Formaldehyd, 3: Resorcin, 4: deionisiertes Wasser.

Qualität des RF- Aerogels

Die Herstellung des RF- Aerogels muss sehr sorgfältig und sauber ablaufen. Die einzelnen Komponenten müssen genau abgewogen und dürfen nicht verunreinigt sein. Bei unsorgfältiger Arbeitsweise erhält man einen kompakten Kunststoff mit einer Dichte von ungefähr $1,2 \text{ g/cm}^3$ statt $0,35 \text{ g/cm}^3$. Bei der Trocknung des RF- Aerogels stört die Bildung von Lösungsmittelmensken die homogene Strukturhaltung. Um dieses Problem zu umgehen wird das Becherglas, indem sich die hellgelbe RF- Lösung befindet, mit Parafilm abgedeckt. Die Abdeckung verhindert, dass das Aerogel zu schnell geliert und trocknet. Nachdem die Gelierung erfolgt ist, wird die Folie nicht komplett abgenommen, sondern es werden drei Löcher mit einem Durchmesser von etwa 0.5 cm hinein geschnitten und somit eine langsamere Verdampfung des Lösungsmittels erzielt. Mit dem langsamen Verdampfen wird die Bildung der Risse auf der Oberfläche verhindert. Ein großer Nachteil dieser Methode ist, dass sie sehr zeitaufwendig ist: Es dauert bei einem Volumen von 500 ml ca. fünf Wochen bis ein trockener Aerogelblock entstanden ist.



Abbildung 3.2: Kompaktes Kunststoff (links), Aerogel mit Rissen (Mitte) und Aerogel (rechts).

3.2 Herstellungsverfahren von Aerogel-Faserverbund-Werkstoff-(AFVW) Proben

Eindrapierungsformen

Zur Herstellung von Faserverbundwerkstoffen sind Formen zum Eindrapieren der Gewebelagen notwendig. Um gute Faserverbundproben herstellen zu können, muss der Deckel der Form nach allen Seiten 1mm Abstand zum Unterteil haben.

Dieser Abstand ist notwendig um das Trocknen des Aerogel-Faserverbund-Werkstoffes zu ermöglichen.

Aus diesem Grund ist es ebenfalls wichtig, dass der Deckel die Probe beim Verschrauben nicht völlig verschließt. Die Flüssigkeit der RF-Lösung kann ansonsten nicht verdampfen.

Im Unterteil der Form befinden sich drei Löcher ($\varnothing = 1 \text{ cm}$), um die Probe aus der Form unbeschadet zu entnehmen.

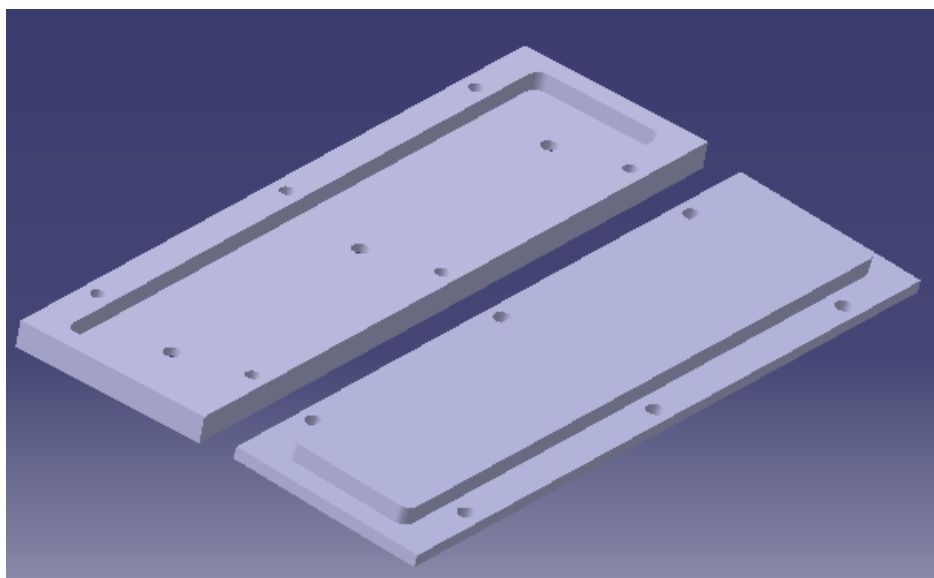


Abbildung 3.3: Form und Deckel für das Laminieren

Reaktion der RF-Lösung mit dem Formwerkstoff

In Edelstahlformen (Werkstoffnummer 1.4301) gelingt die Herstellung von RF-Aerogelen besser als in Stahlform (ST-52).

Die Form wird, bevor die Fasermatten hineingelegt werden, mit PE-Folie ausgekleidet, um ein Anhaften des getrockneten Aerogels zu vermeiden und somit die unbeschadete Entnahme der Proben zu gewährleisten.

Zusätzlich verhindert die PE-Folie den direkten Kontakt der RF-Lösung mit dem Formwerkstoff. Dieser Kontakt des Aerogels mit dem Formwerkstoff führt bei Stahlsorten, wie ST-37, ST-50 und Aluminium zur Schwärzung der Form (Abb. 3.4), bei Edelstahlsorten, wie 1.4301 ist nur eine geringe Verfärbung zu beobachten (Abb. 3.4).



Abbildung 3.4: Form und Deckel , Edelstahl (links), Aluminium(Mitte) und Stahl St 50 (rechts).

AFVW-Probe

Die verwendeten Gewebe werden auf ein Maß von 300 mm X 65 mm und 300 mm X 160 mm zugeschnitten und mit RF-Lösung verschiedener Konsistenzen (s. Kapitel 3.2.4) behandelt.

Die zugeschnittenen und behandelten Gewebeproben werden in zehn Lagen in das Unterteil der Form gelegt und eindrapiert. Zum Schluss wird die Form mit dem Deckel abgedeckt und verschraubt.

Diese Probe in der Form wird dann 7 Tage im Trockenschrank bei 40°C getrocknet. Wann die Probe fertig ist, um aus der Form herausgenommen zu werden, ist daran zu erkennen dass die RF- Lösung geliert ist.

Nachdem die Probe aus der Form herausgenommen ist, wird sie einen weiteren Tag im Trockenschrank getrocknet, um die restliche Flüssigkeit zu entfernen.

Herstellung der AFVW-Laminat-Proben (Aeromats)

Bei der Herstellung der Aeromats werden drei in ihrer Konsistenz unterschiedliche RF-Lösungen als Matrix (zum Aufstreichen auf die Gewebe) eingesetzt.

Die Konsistenzen unterscheiden sich hinsichtlich ihres Gelierungsgrades:

- ungelierete (frische) RF-Lösung,
- angelierte (milchige) RF-Lösung,
- pastenartige gelierte RF-Lösung.

Die ungelierete RF- Lösung wird sofort nach ihrer Herstellung zum Bestreichen der Gewebe benutzt.

Die angelierte RF- Lösung muss, bevor sie eingesetzt wird, ca. 26 Stunden bei 40°C im Trockenschrank gelieren (bis sie eine trübe hellgelbe Farbe bekommen hat (milchig)).

Nach weiteren 5 Stunden im Trockenschrank erhält man die pastenartig gelierte Matrix-Lösung und kann dann verarbeitet werden.

Die Herstellung der Lamine aus den drei in ihrer Konsistenz unterschiedlichen Matrix sind interessant, weil verglichen werden kann, welche der drei Sorten die beste Haftung auf den unterschiedlichen Fasern haben.

Praktische Arbeiten

Nachdem die Fasergewebe mit der Matrix- Lösung bestrichen und aufgelegt werden, wird die Form mit dem Deckel verschraubt, beim Verschrauben des Deckels muss stets darauf Rücksicht genommen werden, dass die Schrauben nicht zu fest gedreht werden, da sonst die Matrix- Lösung überläuft.

Nach ein bis zwei Tagen (entsprechend dem Gelierungsgrad der eingesetzten RF-Lösung) im Trockenschrank werden die Schrauben der Form nachgezogen. Dadurch erhöht sich die Faserhaftung ohne Verlust von Matrix-Lösung.

3.2.1 Verwendete Gewebe

Naturfasergewebe Sorten:

Material	Fadendichte [Fd/cm]	Gewicht [g/m ²]	Garnstärke [Nm]
100% Baumwolle	Kette: 23.5 Schuss: 23.5	130	Kette: 34 Schuss: 34
100% Baumwolle**	Kette: 16 Schuss: 11	155	Kette: 34 Schuss: 15
100% Jute	Kette: 3,1 Schuss: 2,6	185	Kette: 3,6 Schuss: 3,0
100% Jute**	Kette: 4,7 Schuss: 4,8	320	Kette: 3,6 Schuss: 3,0
100% Hanf**	Kette: 11,81 Schuss: 7	510	Kette: 10 / 3x2 Schuss: 10 / 3X2

Tabelle 3: Übersicht Naturfasergewebe. (Alle Naturfasergewebe sind unbehandelt. **Für Zug- und Drei-Punkt-Biegeversuch eingesetzt.)



Abbildung 3.5: Naturfasergewebe. Jute (links), Baumwolle (Mitte) und Hanf (rechts).

Praktische Arbeiten

Aramid und CFK Geweben:

Material	Flächengewicht [g/m ²]	Dicke [mm]	Dichte [g/cm ³]
Aramid HM	61	0,12	1,45
**Aramid HM	225	0,38	1,45
**CFK	410	0,60	1,5

Tabelle 4: Übersicht Synthetische Fasern.
Zusatzinfos im Anhang. **Für Zug- und Drei-Punkt-Biegeversuch eingesetzt.



Abbildung 3.6: links CFK- und rechts Aramidgewebe.

Baumwollgewebe mit RF- Lösung

Bei der Herstellung der Baumwollfaserverbundwerkstoffe mit der RF- Aerogel als Matrix hat sich die ungelierete RF- Lösung bewährt.

Die angelierte und die zur Paste polykondensierte RF-Lösung zeigt keine gute Haftung auf den Baumwollgeweben. Die Haftung wird in flüssiger Form zunehmend besser, deshalb wird die RF- Lösung nach der Herstellung sofort zum Behandeln mit Baumwollgewebe angewendet. So findet die Polykondensation auf der Baumwollfaser selbst statt. Die angelierte oder zur Paste gelierte RF-Lösung zeigte beim Trocknen einen sehr großen Härtingschwund und die Haftung zwischen den Lagen ist im Vergleich zu der ungelierten RF-Lösung wesentlich schlechter.

Der Grund, weshalb die ungelierete RF-Lösung die beste Haftung gezeigt hat, liegt daran, dass Baumwolle von Natur aus saugend ist und sich mit der ungelierten RF-Lösung vollsaugen kann. Dies sorgt später dafür, dass die Polykondensation auf der Faser selbst stattfindet, wo es dann zu einem großen kolloiden Teilchennetzwerk zusammenwächst. Diese Erkenntnis, dass die Polykondensation auf der Baumwollfaser selbst stattfindet, zeigt wie neutral die Oberfläche der Baumwollfaser gegenüber der RF-Lösung ist.

Jutefasergewebe mit RF- Lösung

Bei der Herstellung der Jutefaserverbundwerkstoffe mit Aerogel als Matrixwerkstoff hat sich die zur Paste angelierte RF- Lösung bewährt. Allerdings sind die Faserverbundbauteile auch wesentlich steifer als die Baumwollfaserverbundwerkstoffe. Die Ursache hierfür liegt an der geringen Fadendichte des Jutefasergewebes und der steiferen Eigenschaften der Jute-Faser selbst. Die ungelierete RF -Lösung ist nicht einsetzbar, weil die Jutefaser keine Poly-Kondensation auf der Faser zulässt, dass bedeutet es entsteht kein Aerogel.

Hanffasergewebe mit RF- Lösung

Die Herstellung der Hanffaserverbundwerkstoffe gelingt nicht so gut wie die Jute- und Baumwollfaserverbundwerkstoffe.

Der Grund hierfür ist nicht eindeutig erklärbar. Laut Information des Herstellers werden die Fäden bevor Sie gewebt werden mit Nussöl behandelt, um ein gutes Gleiten der Fäden bei der maschinellen Herstellung der Gewebe zu gewähren. Allerdings wird das Gewebe danach gewaschen (entschlachtet), so dass es theoretisch keine Nussöl Rückstände auf der Faser gibt. Dennoch wird für den Fall, dass trotz Entschlachtung noch Rückstände vorhanden sind das Gewebe mit Ethanol gespült und anschließend einige Male mit Aceton nachgespült, um restliche Rückstände zu entfernen. Diese Behandlung hat das Resultat, dass ein kompaktes Aerogel mit der Dichte 1.2 g/cm^3 statt 0.4 g/cm^3 entsteht, nicht geändert. Es besteht der Verdacht, dass der THC (Tetrahydrocannabinol)-Gehalt dafür verantwortlich ist. Zudem ist bekannt, dass sich die Hanffaser aus dem gleichen Grund schlecht verfärben lässt.

Aramidfasergewebe mit RF- Lösung

Beim Herstellen der Aramidfaser- FVW wird ebenfalls von dessen Saugfähigkeit gebraucht gemacht. Obwohl die Saugfähigkeit verglichen zum Gewicht sehr gering ist und nur bei 3 % liegt, ist die ungelierete RF- Lösung dennoch die Bessere in der Haftung als die angelierte und die zur Paste gelierte RF-Lösung. Dennoch ist die Faser Matrix Haftung nicht ausreichend und die Haftung zwischen den Fasermatten selbst nicht besonders gut. Das hat zur Folge, dass keine großen Torsionsbelastungen aufgenommen werden können.

Pyrolysierte Kohlefasern mit RF-Lösung

Um das Aerogel direkt auf der Kohlefaser selbst haften zu lassen, wird das CFK Gewebe, dessen Fasern mit Epoxydharz imprägniert ist, bei 700°C pyrolysiert, dadurch wird erreicht, dass das Epoxydharzschicht von der Faseroberfläche verschwindet.

Mit dieser Vorbehandlung soll erreicht werden, dass die RF-Lösung direkt auf der CFK-Faser selbst haftet.

Unter dem Rasterelektronenmikroskop (REM Abb. 3.8) ist zu erkennen, dass sich das Epoxydharz von der Faseroberfläche zersetzt hat (Abb. 3.10). Zusätzlich kann man positiv beobachten, das Längsriefen auf der Kohlefaser sind. Dadurch wird die Rauigkeit auf der Faseroberfläche vergrößert und das Aerogel kann sich besser festsetzen. Dies führt zu höheren Gesamtfestigkeiten.



Abbildung 3.7 : FVW- Proben von links. Hanf- , Jute-, Baumwolle-, CFK-, Aramid-FVW.

3.3 REM- Aufnahmen der pyrolysierten Kohlefasern

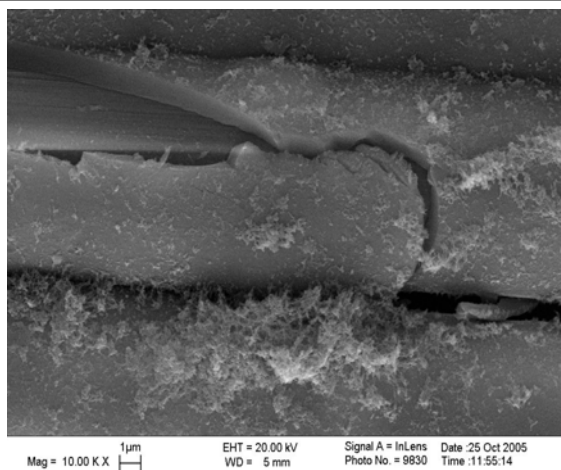


Abbildung 3.8: Kohlefaser mit Epoxydharz imprägniert.[22]

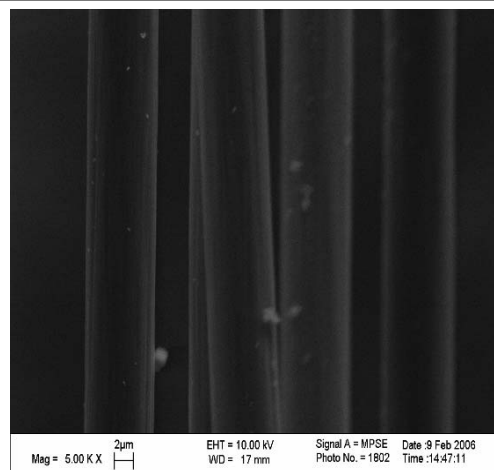


Abbildung 3.9: REM Aufnahmen von pyrolysierten Kohlefasern bei 700°C.

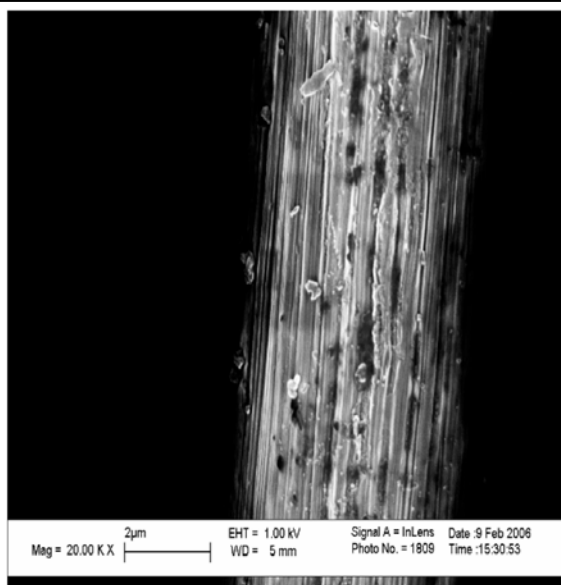


Abbildung 3.10: REM Aufnahme von pyrolysierten Kohlefasern bei 700°C

3.4 Untersuchung der Festigkeit

Einleitung

Um die Funktionalität der Faserverbundwerkstoffe beurteilen zu können, werden an Rechteckproben durch unterschiedliche Versuche die elastischen Kennwerte und die Festigkeiten bestimmt.

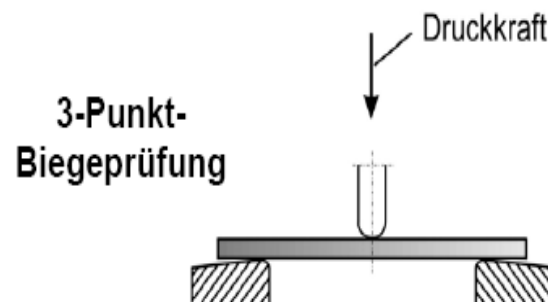
Dazu werden folgende Prüfungen vorgenommen: [7, 8, 10].

- Drei-Punkt-Biegung
- Zugversuch

3.4.1 Drei-Punkt-Biegung

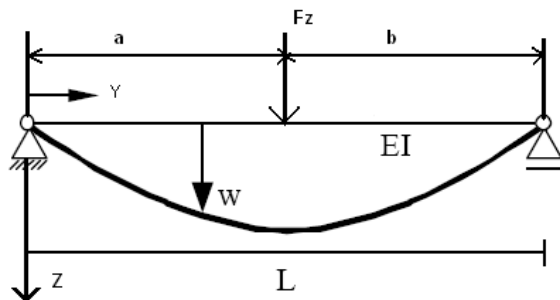
Zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls E eines Materials müssen dafür geeignete Versuche durchgeführt werden. In der Praxis ist dies meist der Drei-Punkt-Biegeversuch. Bei den faserverstärkten Werkstoffen tritt dabei allerdings ein Problem auf, weil der Schubanteil (und damit Schubmodul G) nicht vernachlässigt werden kann. Im Gegensatz zu homogenen Werkstoffen wie Metallen, ist die Spannungsverteilung im Verbundwerkstoff (Laminat) nicht mehr homogen und linear über den Querschnitt, sondern ein Spiegelbild der abwechselnden E -Moduli der verschiedenen Werkstoffschichten (Matrix, Faser). Dadurch entstehen Schubspannungen im Prüfkörper und die klassische Theorie des Biegebalkens muss angepasst werden.

Dazu wird eine Methode vorgestellt, wie der Elastizitätsmodul und der Schubmodul graphisch bestimmt werden können [3, 7, 10].



3.4.1.1 Drei-Punkt-Biegung ohne Schubeeinfluss

Es gilt für die Durchbiegung w unter der Last in Z-Richtung F_z [7, 10]:



$$w = \frac{F_z a^2 b^2}{3 E I_y L} \quad (3.4 - 1)$$

wenn Absenkung in der Mitte

$$a = \frac{L}{2}, b = \frac{L}{2}$$

$$w = \frac{F_z L^3}{48 E I_y}$$

Damit wird der E - modul zu :

$$E = \frac{L^3 \Delta F}{48 I_y w} \quad (3.4 - 2)$$

$$I_y = \frac{b t^3}{12} \quad (3.4 - 3)$$

Biegesteifigkeit :

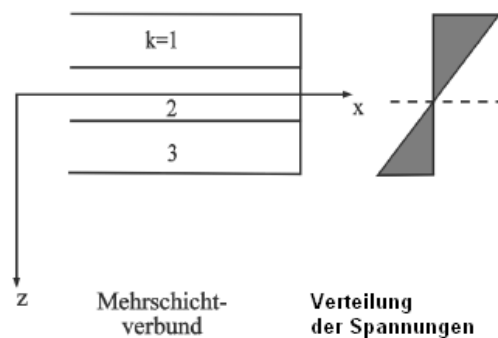
$$B = \frac{L^3 F_z}{48 b w} \quad (3.4 - 4)$$

Hierbei sind :

- B Biegesteifigkeit
- w Durchbiegung
- F_z Kraftänderung
- I_y Flächenträgheitsmoment
- b Probenbreite
- t Probendicke
- L Auflagerabstand



Abbildung 3.11: Prüfmaschine für das 3-P-B



Diese Gleichungen berücksichtigen nicht den Schubeeinfluss im Laminat.

3.4.1.2 Drei-Punkt-Biegung mit Schubeeinfluss in Laminaten

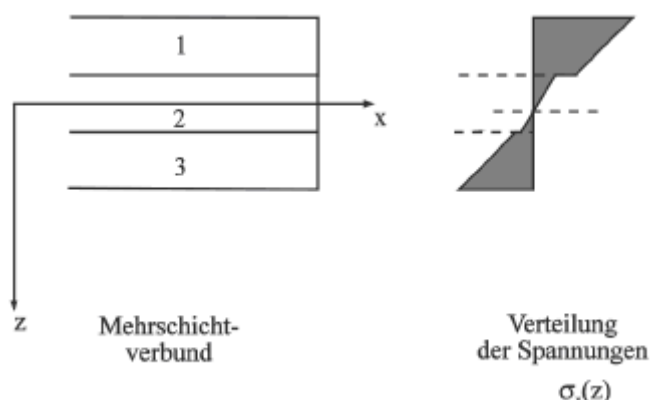
Die Durchbiegung w in der Mitte des Balkens ergibt sich aus dem Anteil der Durchbiegung infolge der Biegung sowie des Schubs [7, 10]:

Praktische Arbeiten

$$w = \frac{FL}{48EI_y} + \frac{kFL}{4GA} \quad (3.4-5)$$

Hierbei sind :

- w Durchbiegung
- F Kraft
- L Auflagerabstand
- E Elastizitätsmodul
- G Schubmodul
- I_y Flächenträgheitsmoment
- A Querschnittsfläche
- k Schubkonstante



Bei Rechteckproben ist:

Querschnittsfläche $A = b \cdot t$ (mit b: Breite und t: Dicke)

Flächenträgheitsmoment $I_y = \frac{b \cdot t^3}{12}$

Schubkonstante infolge Biegung $k \approx 1,2$

Durch Umformen der oberen Gleichung ergibt sich für einen Rechteckquerschnitt:

$$\frac{4 w b t}{FL} = \frac{1}{E} \left(\frac{L}{t} \right)^2 + \frac{k}{G} \quad (3.4-6)$$

Zur Bestimmung von G-Modul und E-Modul wird zunächst ein Biegebruchversuch an einer Probe mit einem Auflagerabstand von 60mm durchgeführt. Damit wird der Bereich des elastischen Verhaltens der Probe im linearen Kurvenbereich bestimmt.

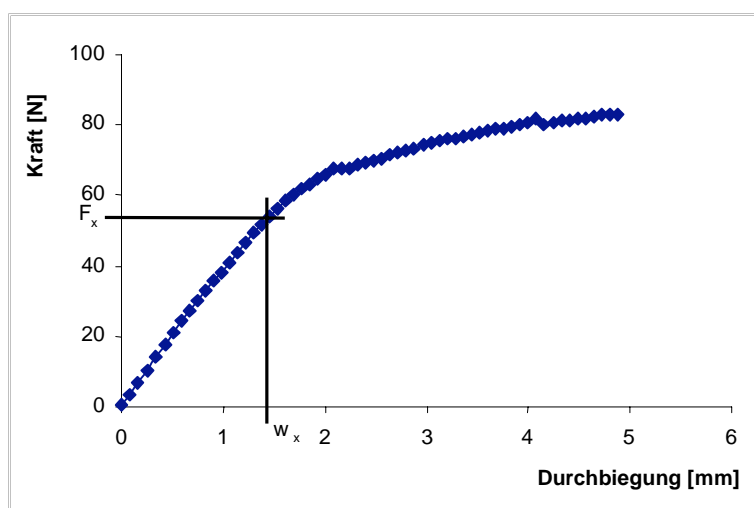


Abbildung 3.12: Schematische Darstellung des Kraft-Weg-Diagramms zur Bestimmung des elastischen Bereichs.

Es ergibt sich daraus der Messbereich für weitere Proben bzw. verschiedene Auflagerabstände der Probe. Die Durchbiegung wird bei unterschiedlicher Biegekraft und unterschiedlichen Auflagerabständen bestimmt. Die ermittelten Werte der Durchbiegung bei verschiedenen Auflagerabständen werden in Gleichung [3.4-6] eingesetzt und ausgewertet (siehe Anhang Beispielrechnung).

Praktische Arbeiten

Werden nun die benötigten Messwerte für unterschiedliche Punkte $(L/t)^2$ aufgenommen und stellt diese graphisch dar, so erhält man den E-Modul aus der Steigung und den G-Modul aus dem Schnittpunkt mit der Y- Achse (siehe Abbildung 3.13). Im Versuch werden für drei unterschiedliche Auflagerabstände Messwerte aufgenommen. Durch diese kann dann eine Ausgleichsgerade gelegt werden, um das Ergebnis zu erhalten. Die Methode mit nur zwei Auflagerabständen ist in den meisten Fällen zu ungenau, da einer der Messwerte ein Ausreißer sein kann.

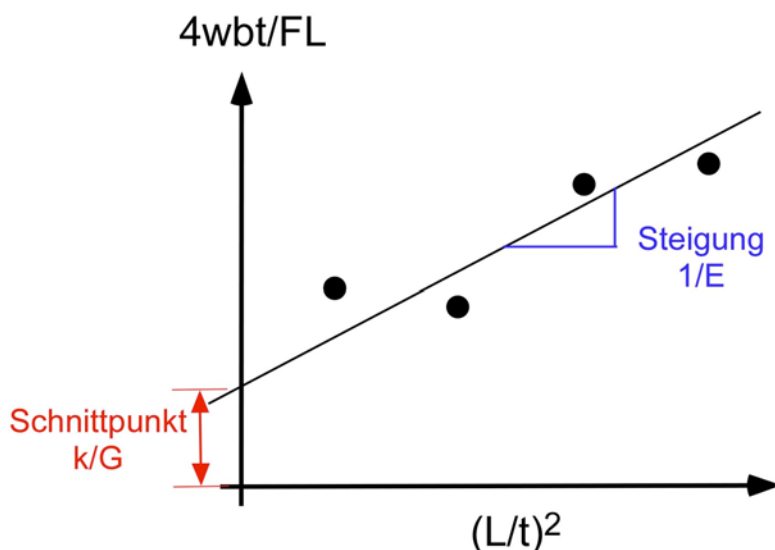


Abbildung 3.13: Zeichnerische Ermittlung von E- und G-Modul.

3.4.2 Biegebruchversuch

Der Aufbau dieses Versuchs entspricht dem der Dreipunktbiegung. Mit Hilfe eines geeigneten Aufnehmers kann die maximale Belastung und Verformung festgehalten werden. Die Probe wird mit kontinuierlich steigender Belastung zum Bruch gebracht. Die Biegebruchspannung kann berechnet werden über [3, 7, 13]:

$$\sigma_B = \frac{3 F_{\max} L_{\text{Aufl.}}}{2 b t^3} \quad (3.4 - 7)$$

Herleitung:

$$\sigma_x = \frac{M_y}{w_{ay}} = \frac{M_y}{I_y} z = \frac{M_y}{I_y} \frac{t}{2} \quad (3.4 - 8)$$

$$I_y = \frac{b t^3}{12}$$

$$\sigma_B = \frac{M_y}{\frac{b t^3}{12}} \frac{t}{2} \text{ mit } M_y = \frac{F L}{4} \Rightarrow \sigma_B = \frac{3 F_{\max} L_{\text{Aufl.}}}{2 b t^3}$$

Das dazugehörige Bruchmoment:

$$m = \frac{F_{\max} L_{\text{Aufl.}}}{4 b} \quad (3.4 - 9)$$

Hierbei sind:

F_{\max}	maximal ertragene Kraft
$L_{\text{Aufl.}}$	Auflagerabstand
b	Probenbreite
t	Probendicke

3.4.3 Zugversuch

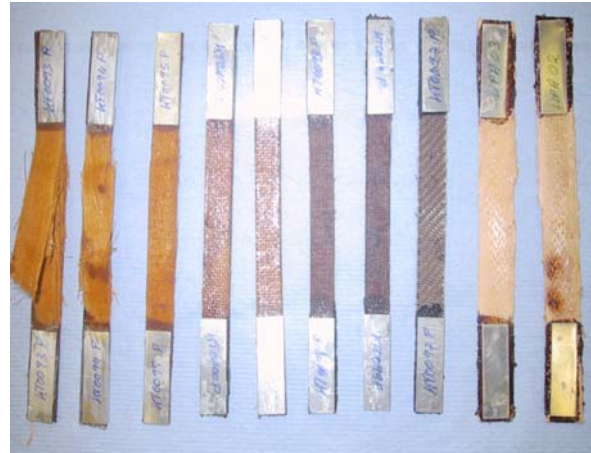
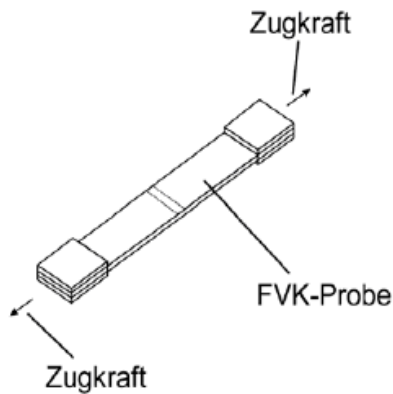


Abbildung 3.14: RF- Aerogel- FVW Zug-Bruch-Proben.

$$E_z = \frac{\Delta F}{b \cdot t \cdot \Delta \epsilon} \quad (3.4 - 10)$$

$$\text{mit } \Delta \epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3.4 - 11)$$

$$D = \frac{\Delta F}{b \cdot \Delta \epsilon} \quad (3.4 - 12)$$

Hierbei sind :

- E_z Zug - E - Modul
- D Dehnsteifigkeit
- L_0 Länge des Messbereiches im unbelasteten Zustand
- ΔL Längenänderung
- b Probenbreite
- t Probendicke
- ΔF Kraftänderung

3.4.4 Zugbruchversuch

Eine Art, die Bruchspannung eines Laminates zu bestimmen, ist der Zugbruchversuch. Die Belastungen werden solange kontinuierlich erhöht, bis das Laminat versagt [7,10].

$$\sigma_{Z.B} = \frac{F_{\max}}{b \cdot t} \quad (3.4 - 13)$$

Die Bruchschnittlast :

$$n = \frac{F_{\max}}{b}$$

Hierbei sind :

- F_{\max} maximal ertragene Kraft
- b Probenbreite
- t Probendicke

Abbildung 3.15: Zugprüfmaschine von Instron.

Ablauf des Zugversuchs

Die Zugprobe wird mit einer Prüfmaschine mit langsamer und **konstanter Geschwindigkeit 1 mm/min** bis zum Bruch gezogen. Während des Versuchs zeichnet ein Schreiber die Kraft F (in N) und die Länge L (in mm) in ein Kraft -Verlängerungs-Diagramm auf.

3.5 Berechnung des Faservolumenanteils aus der Dicke

In die Berechnung des Faservolumenanteils aus dem Dicken gehen drei Messgrößen ein.

- I. Dicke des Laminats (t)
- II. Dichte der Faser, wobei hier das Verhältnis von Flächengewicht zu Dichte berücksichtigt wird (G):
- III. Gesamtflächengewicht (m)
- IV. Lagenzahl (n)

$$\frac{\text{Gesamtflächengewicht} \left[\frac{\text{g}}{\text{dm}^2} \right]}{\text{Dichte} \left[\frac{\text{g}}{\text{dm}^3} \right]} = \text{Dicke} [\text{dm}]$$

Durch Dreisatz ergibt sich folgende Gleichung :

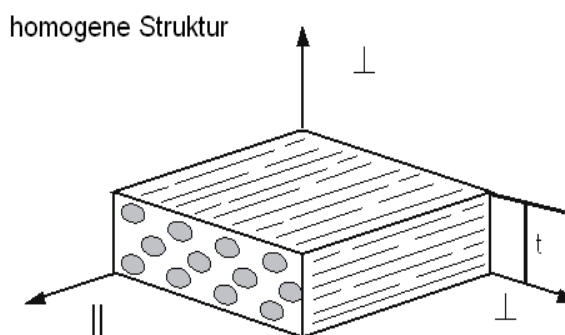
$$\frac{x}{\frac{\text{Gesamtflächengewicht}}{\text{Dichte}}} = \frac{100\%}{\text{Dicke}}$$

V_f = Faservolumenanteil

$$V_f = \frac{100\% \cdot \frac{\text{Gesamtflächengewicht}}{\text{Dichte}}}{\text{Dicke}}$$

$$V_f = \frac{100\% \cdot \frac{\text{Gesamtflächengewicht}}{\text{Dichte}} \cdot \text{Lagenzahl}}{\text{Dicke}}$$

$$V_f = \frac{100\% \cdot \frac{\text{Gesamtflächengewicht}}{\text{Dichte}} \cdot n}{t} \quad (3.4 - 14)$$



4 Auswertung und Diskussion der Ergebnisse

In dieser Arbeit, werden Natur-Faser-Verbundwerkstoffe sowie CFK- und Aramid- Faser-Verbundwerkstoffe mit RF- Aerogel als Matrixwerkstoff hergestellt und auf ihre Festigkeiten und Kennwerte untersucht. Zusätzlich werden die Kennwerte des reinen RF-Aerogel-Werkstoffs ermittelt.

Mit den Faser-Verbundwerkstoffen werden Drei-Punkt-Biegeversuche und Zugversuche durchgeführt. Beim Ermitteln der mechanischen Kennwerte (E-Modul und G-Modul) müssen die Messwerte mit und ohne Schubeinfluss unabhängig voneinander betrachtet werden. Dabei bedeutet der Wert mit Schubeinfluss, dass der ermittelte mechanische Kennwert (E-Modul) durch den Schubeinfluss beeinflusst ist. Deshalb werden die Ergebnisse mit Hilfe von zwei unterschiedlichen Rechenwegen ermittelt und verglichen.

4.1 Ergebnisse der Drei-Punkt-Biegeversuche (3-P-B)

4.1.1 Reines RF- Aerogel

Das Ziel der Drei-Punkt-Biegeversuche am reinen RF- Aerogel ist mittels des Kraft- Weg Diagramms den Elastizitätsmodul (E), den Schubmodul (G) und die Biegesteifigkeit (B) zu bestimmen. Dafür werden die Proben in Rechteckblöcke geschnitten und anschließend in der Prüfmaschine untersucht.

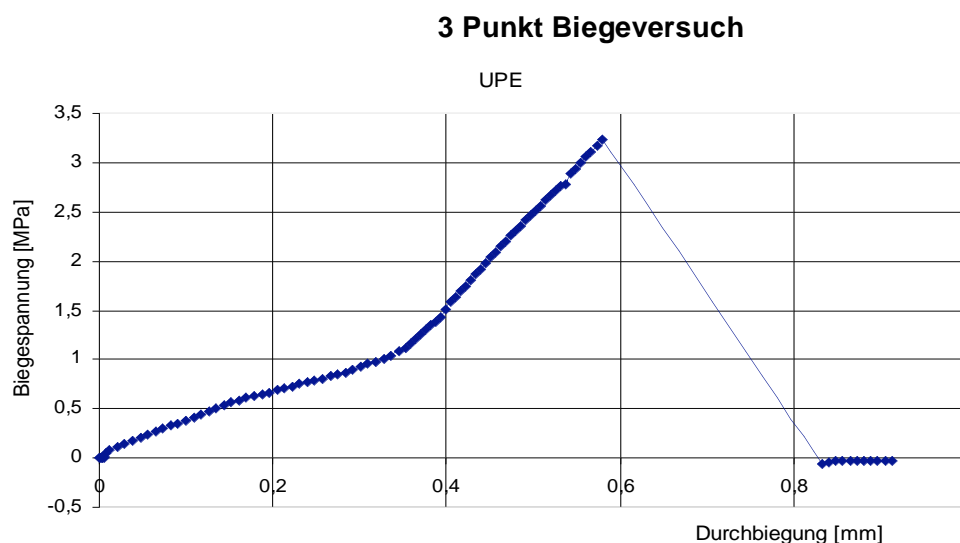


Abbildung 4.1: Diagramm des Biegebruchversuchs am reinen RF-Aerogel mit $L_{\text{Auflager}}=45\text{mm}$.

Bis zum Bruch der Probe steigt der Kurvenverlauf stetig dreimal (s. Abbildung 4.1) linear an. Das bedeutet, dass sich das RF-Aerogel bis zum Bruch sehr steif verhält und sich praktisch nicht plastisch verformt. Das RF-Aerogel ist ein spröder Werkstoff, der beim Erreichen seines Maximalwerts sofort bricht.

Auswertung und Diskussion der Ergebnisse

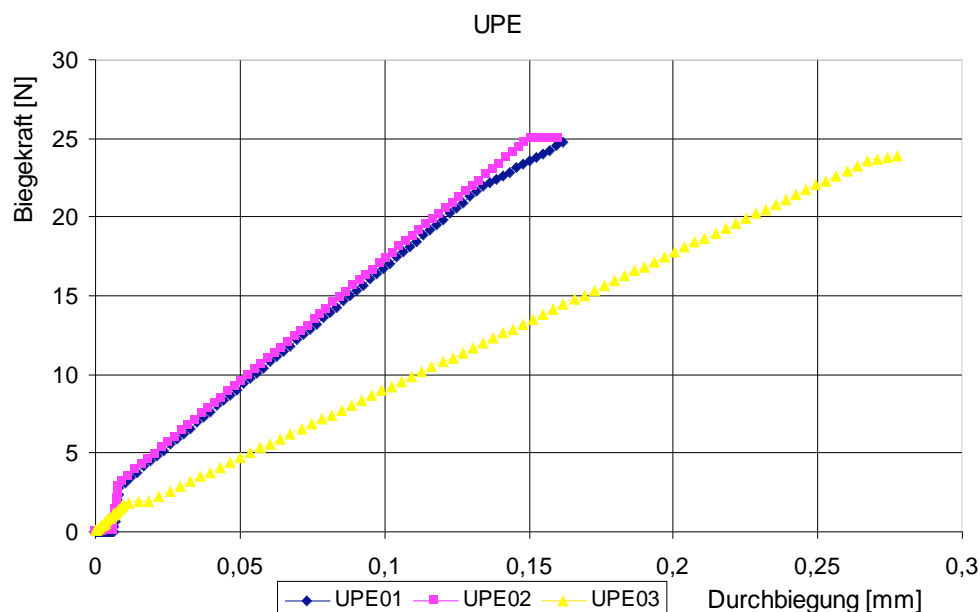


Abbildung 4.2: Reines RF-Aerogel bei der 3-P-B zur Bestimmung des E-Moduls und der Biegesteifigkeit mit $L_{\text{Auflager}}=45\text{mm}$.

Im Diagramm der Abbildung 4.2 sind die linearen Verformungen der drei nahezu identischen Aerogel-Proben in den elastischen Bereichen dargestellt. Zu sehen ist auch, dass die Steigung der Geraden der Proben UPE01 und UPE02 nahezu gleich sind. Die RF-Aerogele haben ein E-Modul von ungefähr 85 MPa.

4.1.2 Naturfaserverbundstoffe

Aerogel-Jute-FVW

Die Biegesteifigkeit der Jute Faser-Verbundwerkstoffe ist sehr groß. Die gute Biegefestigkeit wird durch die sehr gute Haftung von Faser und Matrix erreicht.

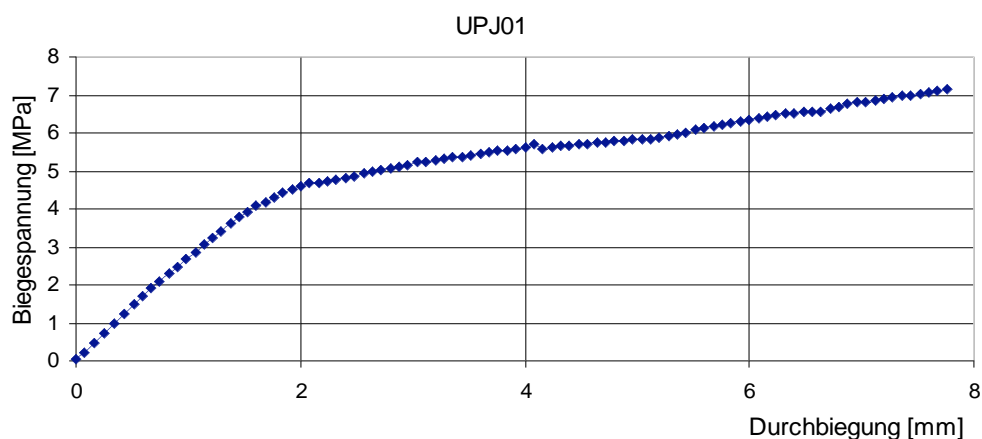


Abbildung 4.3: 3-P-B Diagramm der Jute FVW.

Der Drei-Punkt-Biegebruchversuch von Aerogel-Jute-FVW konnte mit der vorhandenen Anlage nicht bis zum Bruch verfolgt werden, da dieses Prüfgerät nur einen Verformungsweg von maximal 8mm zulässt.

Auswertung und Diskussion der Ergebnisse

Die Aerogel-Jute-FVW-Probe hatte eine Dicke von 8mm und einen Auflagerabstand von 60mm. Bei diesem Versuch ist sie bei einem Verformungsweg von 8mm nicht gebrochen, sondern hat diese Belastung ohne Schaden überstanden. Die Probe ist in der Lage eine wesentlich höhere Belastung aufzunehmen.

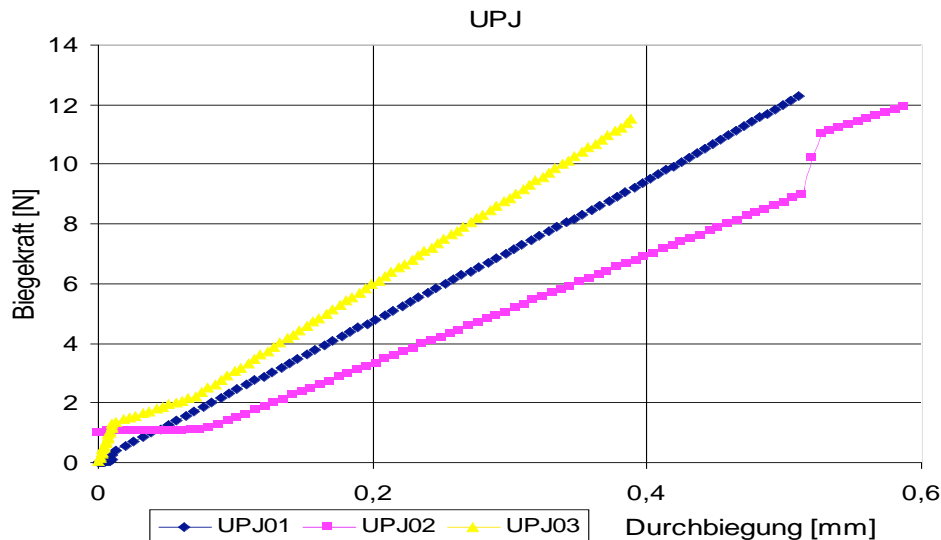


Abbildung 4.4: 3-P-B drei Proben im elastischen Bereich belastet.

Zur Bestimmung des E-Moduls werden die Messdaten der Proben des elastischen Bereichs ausgewertet. In Abbildung 4.4 ist die lineare Steigung gut zu Erkennen. Die Steigung der Geraden kann berechnet und der E-Modul bestimmt werden.

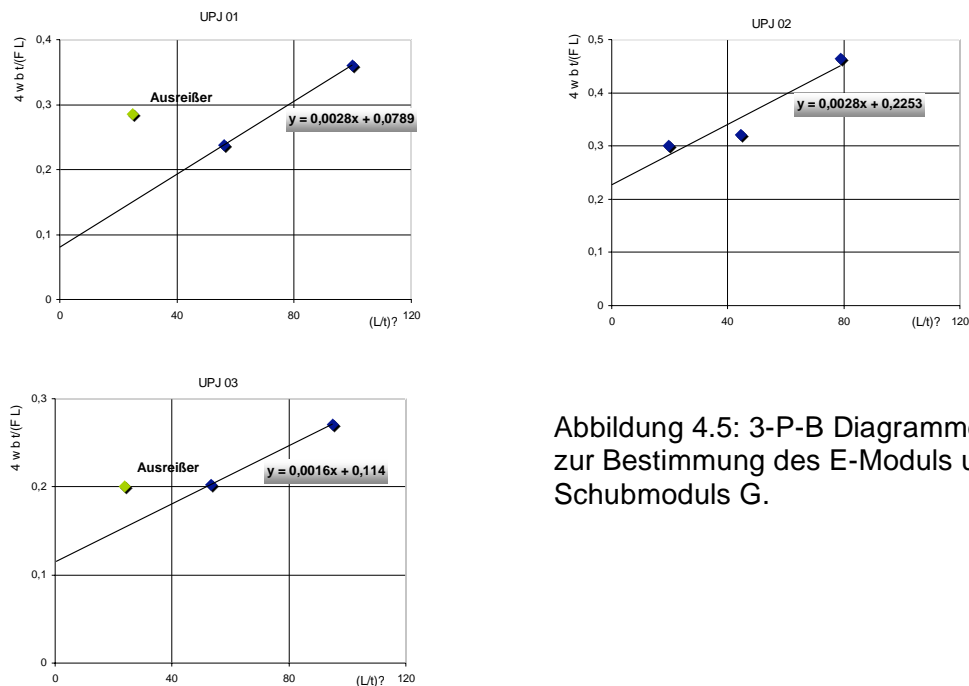


Abbildung 4.5: 3-P-B Diagramme zur Bestimmung des E-Moduls und Schubmoduls G.

Auswertung und Diskussion der Ergebnisse

Beim Bestimmen der E-Module sowie der Schubmodule G werden alle drei Diagramme verwendet. Bei den Proben UPJ01 und UPJ03 zeigten die ersten Punkte einen Ausreißer, die bei der Geradenanpassung unberücksichtigt sind. Die E-Module konnten durch die Steigungen und die Schubmodule durch die Schnittpunkte mit der vertikalen Koordinatenachse im Nullpunkt bestimmt werden.

Aerogel-Baumwolle-FVW

Der Baumwolle-FVW ist im Bezug auf die Faser-Matrix Haftung ebenfalls sehr gut. Er zeigt sehr gute Flexibilitäten auf, obwohl das RF-Aerogel ein sehr spröder Werkstoff ist. Dies hat zum einen mit der Saugkraft (hydrophil=wasserliebend) der natürlichen Baumwollfaser und zum anderen mit der Fadendichte des Gewebes zu tun. Die Fadendichte beeinflusst das elastische Verhalten bzw. die Steifigkeit.

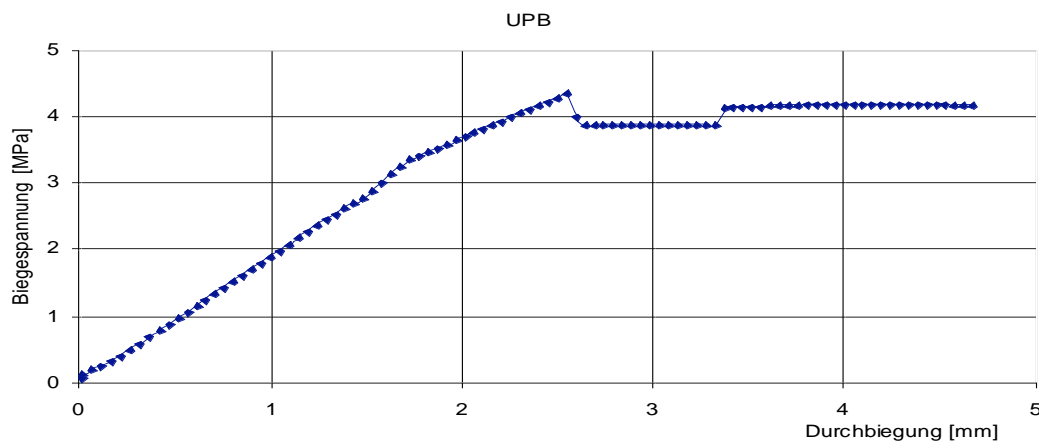


Abbildung 4.6: 3-P-B Diagramm der Baumwolle FVW.

In Abbildung 4.6 ist zu sehen, wie elastisch sich der Baumwolle FVW in diesem Versuch bis zum Bruch verhalten hat. Bei einer Probendicke von nur $t = 4$ mm hat er einen elastischen Weg von 2.5 mm zurückgelegt, bis die Probe an Steifigkeit abgenommen hat, ohne dass die Probe dabei zu Bruch gegangen ist. Außerdem ist zu sehen wie die Biegespannung ab 4MPa ihren Wert beibehält.

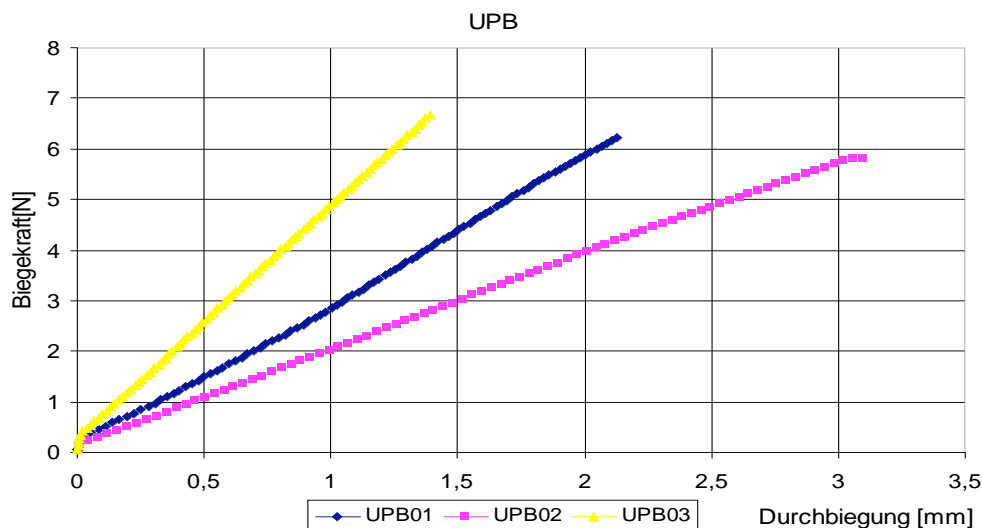


Abbildung 4.7: 3-P-B drei Proben im elastischen Bereich belastet.

Auswertung und Diskussion der Ergebnisse

Alle drei Geraden in Abbildung 4.7 variieren im Kraft- Weg Diagramm voneinander. Die Ursache hierfür ist, dass die Proben kleine geometrische Abweichungen voneinander haben. (siehe Anhang 6).

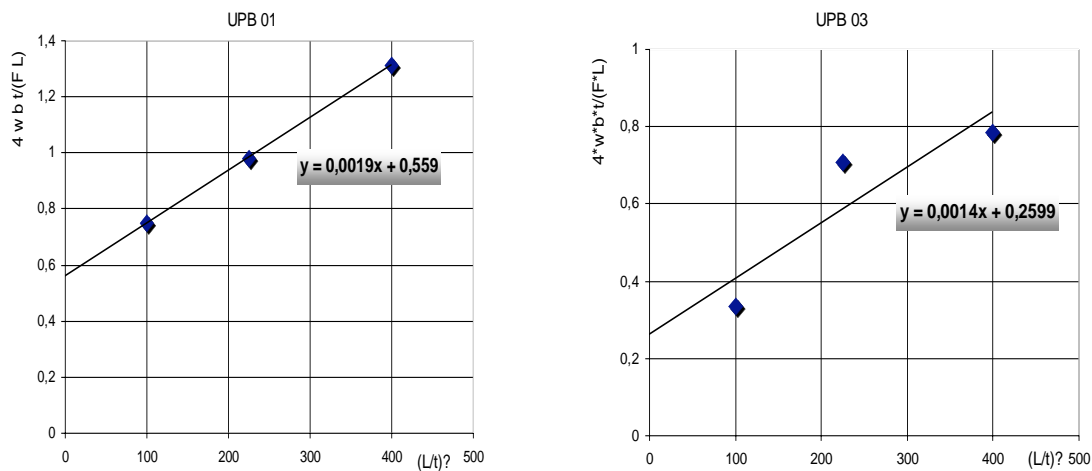


Abbildung 4.8 : 3-P-B Diagramme zur Bestimmung des E-Moduls und Schubmoduls G.

Bei der Probe UPB01 liegt der Ausgleichsgerade genau auf den Punkten und bei der Probe UPB03 kann ebenfalls eine Geradenanpassung vorgenommen werden.

Aerogel-Hanf-FVW

Bei der Herstellung der Hanf-FVW bildet sich im Verbund der Hanffaser mit der Matrix ein kompakter Kunststoff, welcher anstelle einer Dichte von $0,4 \text{ g/cm}^3$ eine Dichte von ungefähr $1,2 \text{ g/cm}^3$ hat.

Der kompakte Kunststoff ist wesentlich stabiler als das Aerogel.

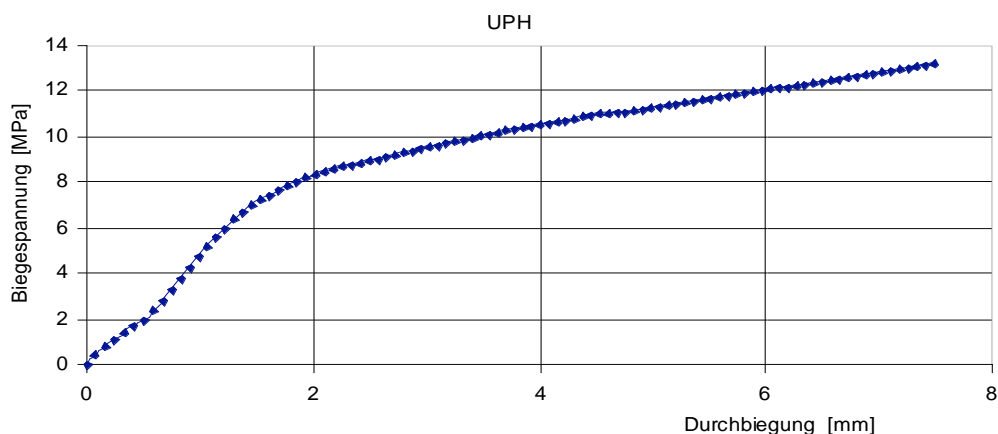


Abbildung 4.9: 3-P-B Diagramm von Hanf-FVW

Da sich der Hanf-FVW sehr elastisch verhält ist der Verformungsweg sehr lang, ohne dass die Probe zerbricht.

Auswertung und Diskussion der Ergebnisse

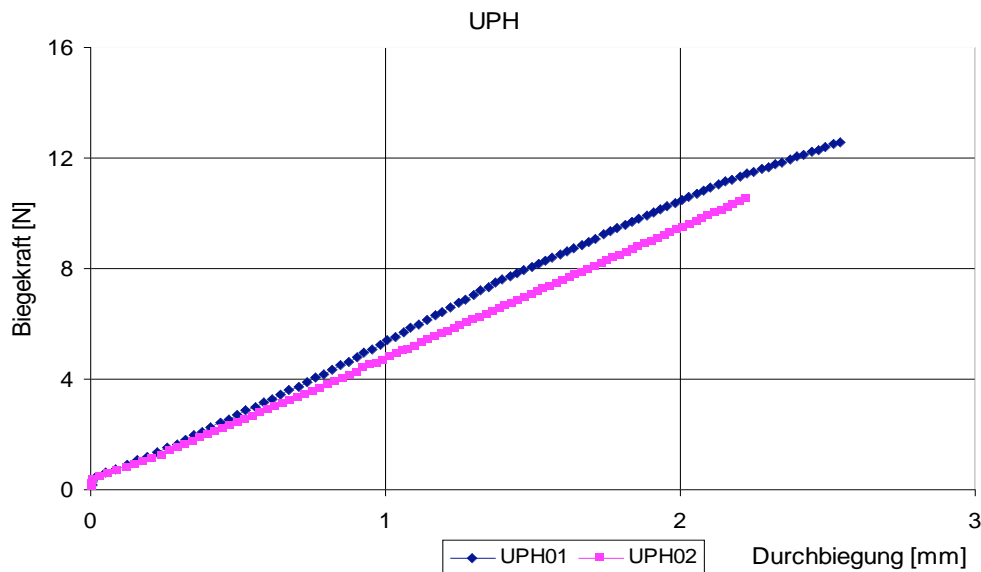


Abbildung 4.10: 3-P-B im elastischen Bereich belastet.

Die Messwerte der beiden Proben zeigen nahezu die gleiche Steigung. Dies spricht für die Gleichmäßigkeit der Proben und die Reproduzierbarkeit ihrer Herstellung (s. Abbildung 4.10).

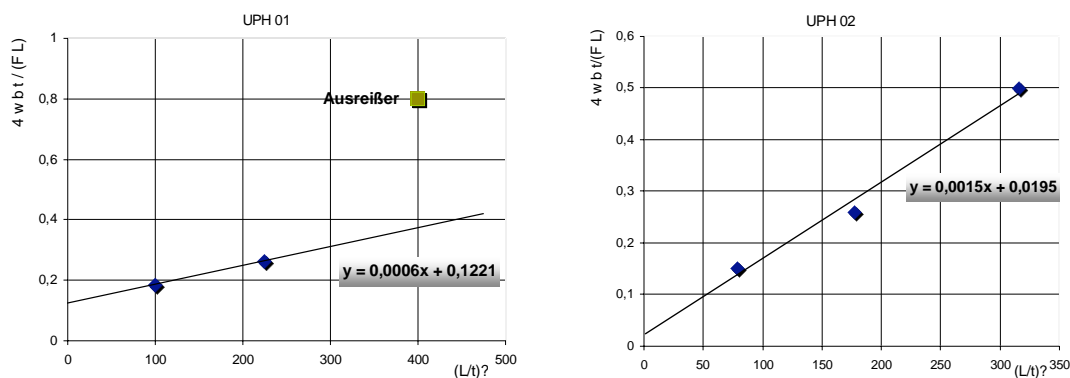


Abbildung 4.11: 3-P-B Diagramme zur Bestimmung des E-Moduls und Schubmoduls G.

In Abbildung 4.12 ist zu sehen, dass die Ausgleichsgeraden angepasst werden können. Bei Probe UPH01 wird ein Messpunkt als Ausreißer betrachtet, dennoch kann der E-Modul und der Schubmodul bestimmt werden.

4.1.3 Aramid und CFK-FVW

Aerogel-CFK-FVW

Die Untersuchungen an CFK-FVW sollen an unbeschichteten, d.h. epoxydharzfreien Fasern durchgeführt werden. Dafür werden die CFK-Fasern nur pyrolysiert eingesetzt. Die CFK-Faser, ohne die Beschichtung mit Epoxydharz, hat ihre Festigkeit / Steifigkeit durch die Pyrolyse verloren. Der Faserverbund ist wesentlich lockerer geworden. Das Bearbeiten der Matten mit Aerogelen unter Beibehaltung der Faserorientierung im Gewebe ist daher schwierig

Auswertung und Diskussion der Ergebnisse

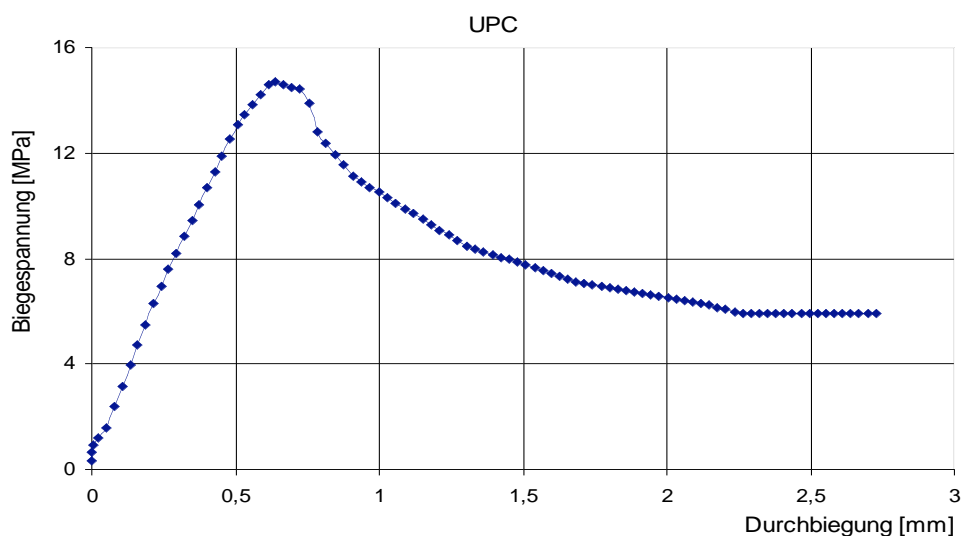


Abbildung 4.12: 3-P-B Diagramm von CFK-FVW.

Die Kurve in Abbildung 4.12 zeigt, dass es nahezu keine plastische Verformung des VFW gibt. Das hat mit der hohen Steife sowohl des Aerogels als auch des CFK Werkstoffes zu tun. Weil die Haftung zwischen Faser und Aerogel nicht besonders groß ist, versagt das ganze System schlagartig, wenn es sein Maximum erreicht hat, ohne dabei plastisch verformt zu werden.

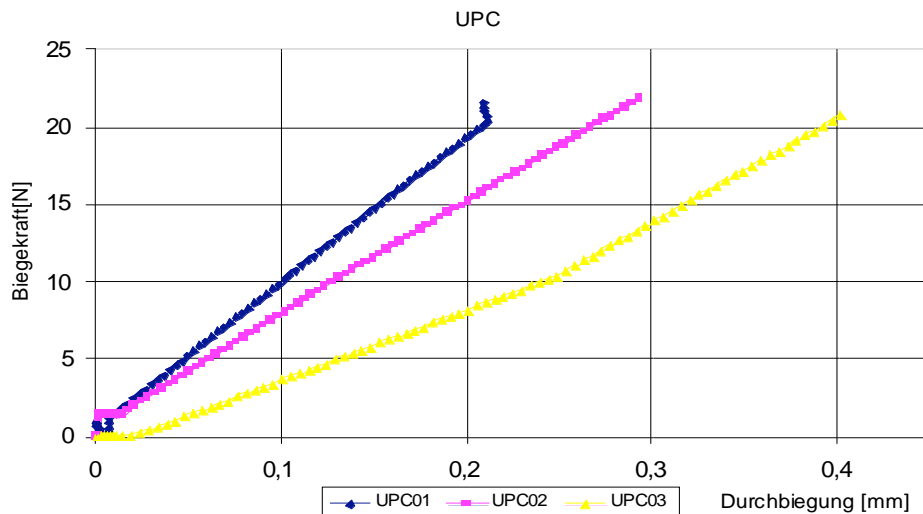
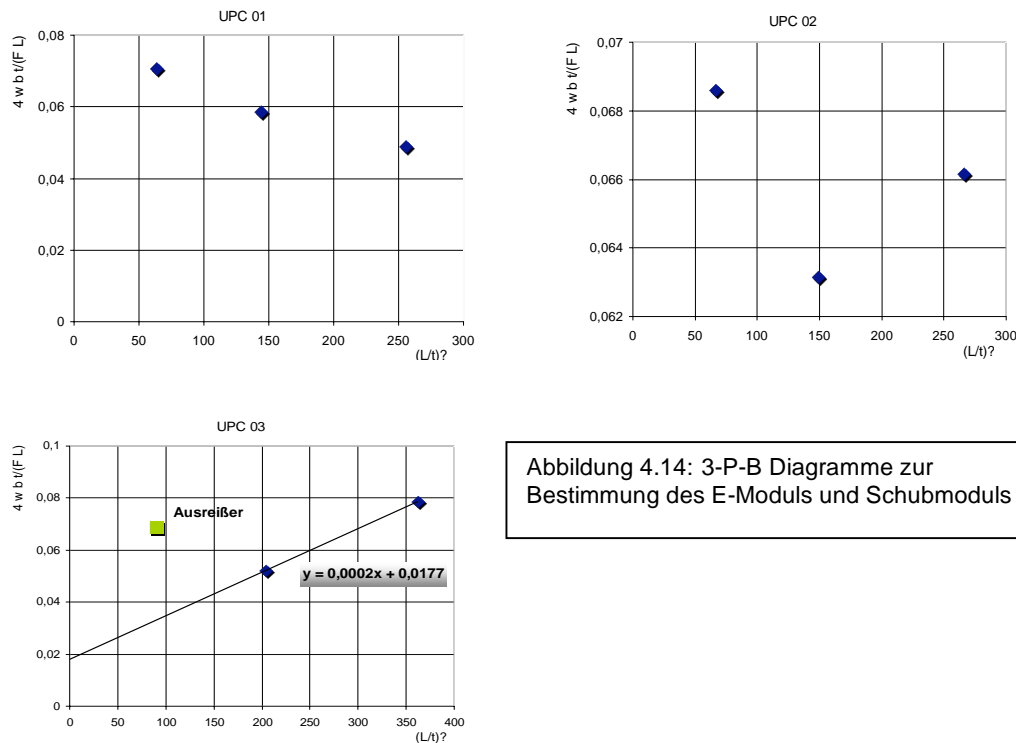


Abbildung 4.13: 3-P-B im elastischen Bereich belastet.

Auswertung und Diskussion der Ergebnisse



In Abbildung 4.14 sind drei 3-P-B-Diagramme zur Ermittlung der Module dargestellt. Bei der Probe UPC1 zeigen die Punkte eine negative Steigung und bei UPC2 gibt es große Abweichungen der Messpunkte untereinander, die keine sinnvolle Geradenanpassung zulassen.

Aerogel-Aramid-FVW

Die Aramidfasern zeigen eine gute Benetzung mit dem Aerogel, dennoch ist es insgesamt ein spröder, fester Werkstoff, dem es an Flexibilität fehlt.

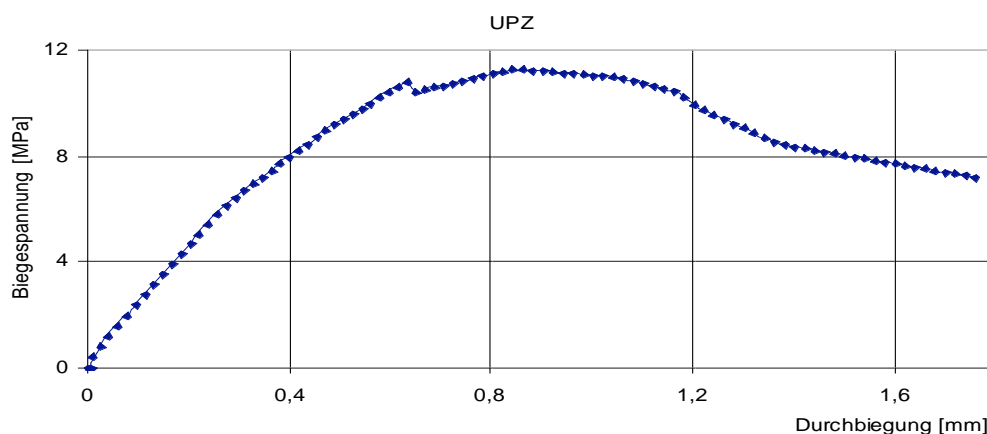


Abbildung 4.15: 3-P-B Diagramm von Aramid- FVW.

In Abbildung 4.15 ist das Verhalten des Aramid-FVW im elastischen, wie auch im plastischen Bereich dargestellt. Die Probe zeigt nur in einem kurzen Verformungsweg (0,8 mm) elastisches und plastisches Verhalten. Dies ist ein großer Nachteil für die mechanischen Eigenschaften der Probe. Die Faser-Matrix-Haftung der Probe versagt frühzeitig, was dazu führt, dass der Werkstoff als spröde betrachtet wird.

Auswertung und Diskussion der Ergebnisse

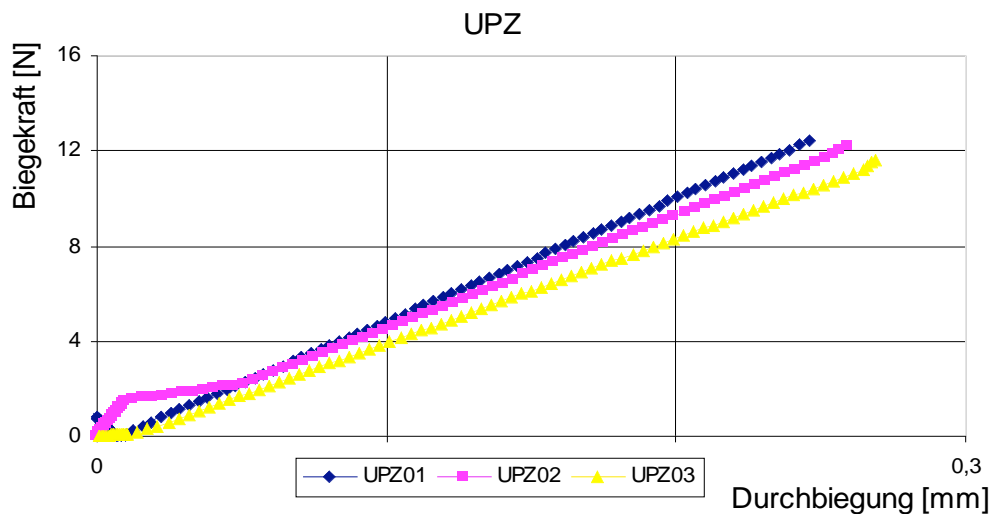


Abbildung 4.16: 3-P-B im elastischen Bereich belastet.

Die Steigungen der Geraden in Abbildung 4.17 sind sich nahezu identisch. Der ermittelte E-Modul ist annähernd gleich.

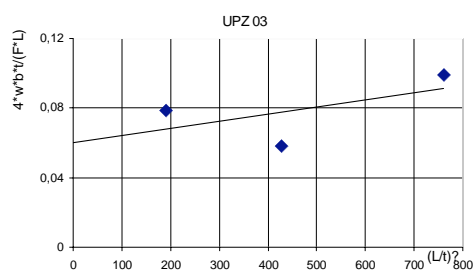
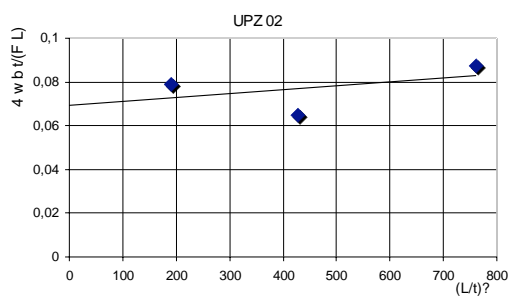
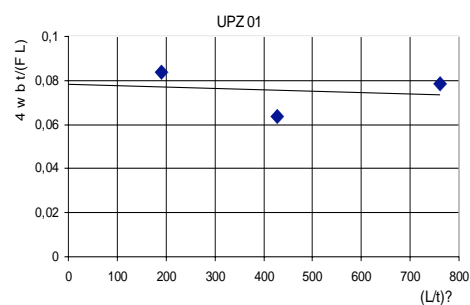


Abbildung 4.17: 3-P-B Diagramme zur Bestimmung des E-Moduls und Schubmoduls G.

In Abbildung 4.17 sind drei 3-P-B-Diagramme zur Ermittlung der Module dargestellt. Mit diesen Messwerten ist eine sinnvolle Geradenanpassung nicht möglich. In diesem Fall konnten die E-Module und G-Module nicht bestimmt werden.

4.2 Ergebnisse der Zugversuche

4.2.1 Naturfaserverbundstoffe

Aerogel- Jute- FVW

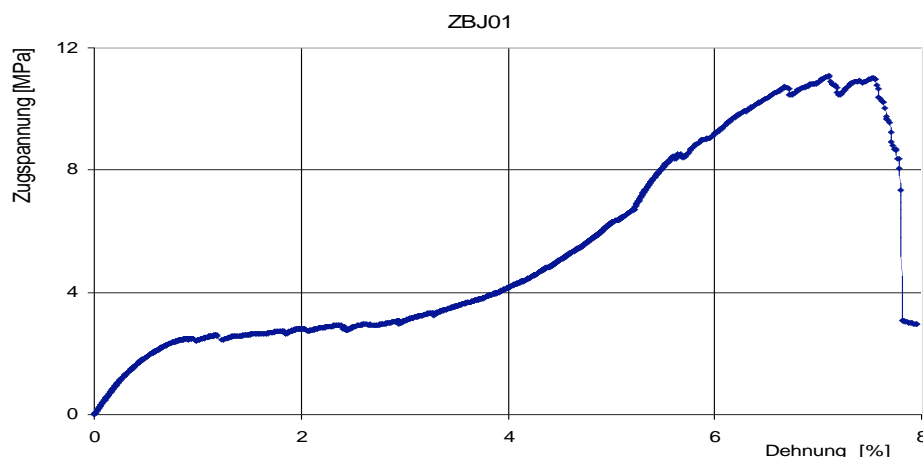


Abbildung 4.18: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Aerogel- Jute- FVW.

Der Jute-FVW zeigt einen interessanten Kurvenverlauf: erst steigt die Zugspannung linear mit der Dehnung an, zeigt aber nach etwas weniger als einem Prozent Dehnung einen flachen Verlauf, bei dem die Zugspannung annähernd konstant bleibt, um dann ab 3% Dehnung annähernd parabolisch anzusteigen bis die Bruchgrenze erreicht wird. Dieser Kurvenverlauf wird weiter unten diskutiert.

Aerogel- Baumwolle- FVW

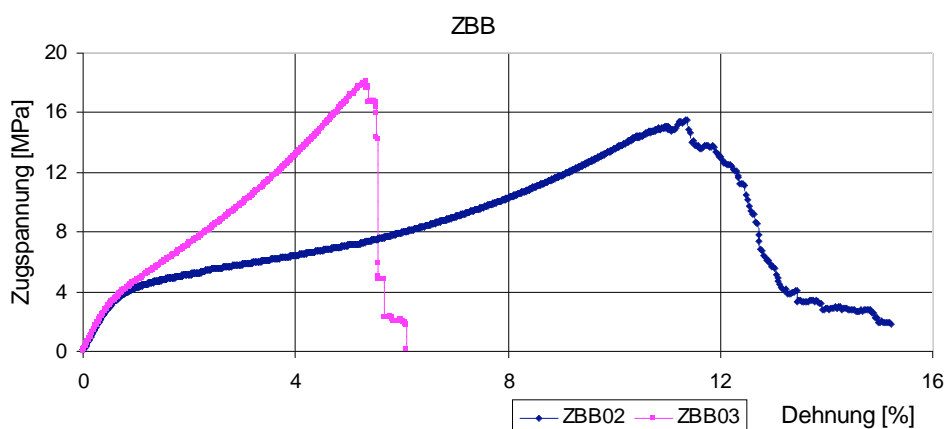


Abbildung 4.19: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Aerogel- Baumwolle- FVW.

Abbildung 4.20 zeigt den Kurvenverlauf von zwei Aerogel-Baumwolle-FVW-Proben. Erstens haben beide Kurven fast identische elastische Verläufe und zweitens ist die Auswirkung der unterschiedlich langen Trockenzeit der Proben im Trockenschrank zu erkennen.

Bei Probe ZBB02 betrug die Trockenzeit, nachdem es aus der Form herausgenommen wurde, 24 Stunden und bei der Probe ZBB03 48 Stunden. Die Trockenzeiten haben keinen Einfluss auf den E-Modul, allerdings wird die FVW- Probe dadurch steifer und ihre Plastizität nimmt eindeutig ab. Der Werkstoff kann aber dafür höhere Kräfte aufnehmen. Diese Erkenntnis kann bei Baumwolle- FVW von sehr großem Vorteil sein, um seine Steifigkeit gezielt, ohne großen Aufwand zu beeinflussen.

Aerogel-Hanf-FVW

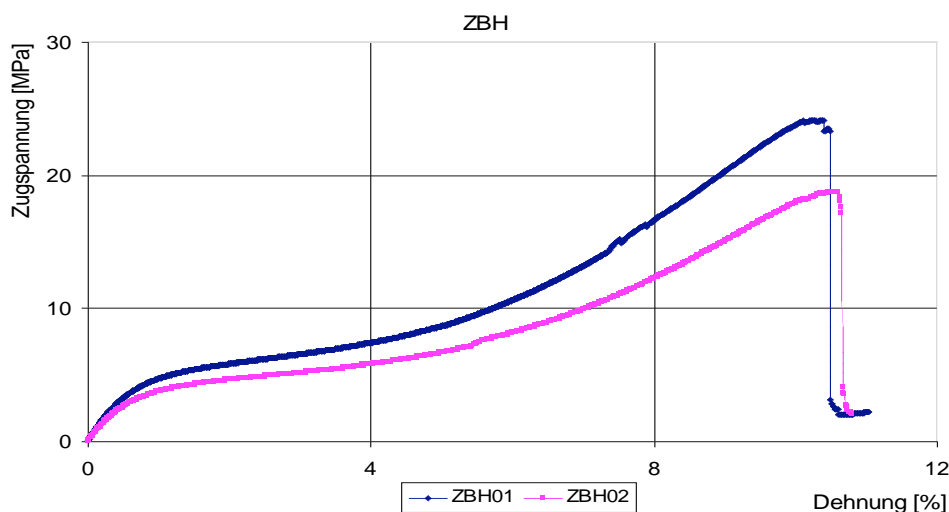


Abbildung 4.20: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Aerogel- Hanf- FVW.

Bei dem kompakten Matrixwerkstoff, der aus der Verbindung von RF-Aerogellösung und Hanf-Fasern resultiert, ist nahezu der gleiche Kurvenverlauf beider Proben in Abbildung 4:21 zu erkennen. Dadurch resultiert ein fast identischer E-Modul im elastischen Bereich.

Alle drei Typen von Aerogel-Naturfaserverbundwerkstoffen zeigen den gleichen Verlauf des Spannungs-Dehnungs-Diagramms. Nach einem linear elastischen Anstieg folgt ein Plateau und dann ein parabolischer Anstieg der Zugspannung bis zum Bruch. Die Interpretation der Kurven ist nicht eindeutig. Es könnte sein, dass das Matrix-Aerogel bei etwas weniger als einem Prozent Dehnung bricht (in Übereinstimmung mit den Ergebnissen des Biegeversuches am reinen Aerogel), die Garne der Naturfasergewebe aber noch parallel zur Belastungsrichtung über das Aerogel miteinander verbunden sind. Da die Garne (und die darin enthaltenen Fasern) aber noch intakt sind, steigt bei weiterer Dehnung die Spannung nur schwach an, da die Aerogelmatrix einerseits kontinuierlich weiter reißt und andererseits die Fasern in den Garnen mit steigender Dehnung weiter in Belastungsrichtung ausgerichtet werden. In dem Maße, wie dieser Prozess der Ausrichtung fortschreitet, steigt die Spannung an. Es mag sein, dass auf Grund der starken Querkontraktion der Gewebe dieser Anstieg dann nicht linear sondern eher parabolisch erfolgt.

Der Kurvenverlauf könnte aber auch anders interpretiert werden. Der linear elastische Anstieg bei kleinen Dehnungen ist trivial. Das Plateau ist darauf zurück zu führen, dass sich die Fasern Stück für Stück von der Matrix lösen. Da dies bedeutet, dass sich der Querschnitt verkleinert, bedeutet die Berechnung der wirksamen Spannung mit Bezug zum ursprünglichen Querschnitt, dass die Spannung konstant bleibt. Der Anstieg bei größerer Dehnung ist dann wieder zu erklären wie bei der ersten Interpretation.

4.2.2 Aramid und CFK-FVW

Aerogel- Aramid- FVW

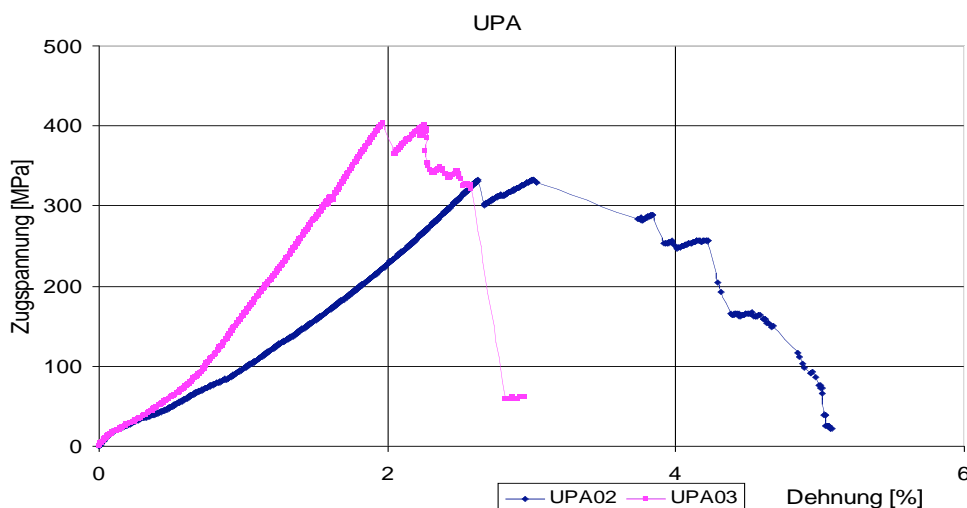


Abbildung 4.21: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Aerogel- Aramid- FVW.

Aramid- FVW ist von der Festigkeit betrachtet ein sehr steifer Werkstoff wie man auch Abbildung 4.22 entnehmen kann. Es zeigt nahezu keine plastische Verformung und versagt fast sofort nach elastischer Steigung bei einer Spannung von nahezu 340-400 MPa. Obwohl die Faser-Matrix-Haftung nicht optimal ist (siehe Abbildung 4.32), wird nach dem ersten Einknickpunkt der Kurve nochmals der Höchstlastwert von 400 MPa, bzw. 340 MPa erreicht.

Aerogel-CFK-FVW

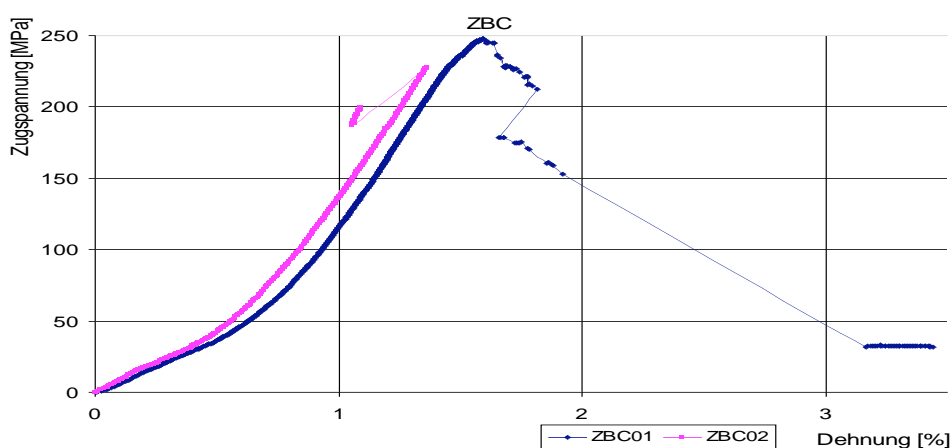


Abbildung 4.22: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Aerogel- CFK- FVW.

Bei der CFK- FVW besteht das Problem die Faserorientierung beizubehalten, nachdem das Gewebe pyrolysiert ist. Die Faserorientierung hat sich aufgrund des losen Zustands beim Bearbeiten mit RF- Aerogel immer wieder verschoben, wodurch mit Sicherheit eine Verfälschung im Diagramm zu erwarten ist.

Ein Indiz dafür, dass sich die Faserorientierungen verschoben haben, ist, dass keine großen Zugspannungen erreicht werden konnten, wobei die Festigkeiten von CFK wesentlich höher sein müssten als Aramid-FVW bei fast doppeltem Flächengewicht.

4.3 Auswertung der REM-Aufnahmen

Rasterelektronenmikroskopie kann an den RF-Aerogel-Verbundwerkstoffen nicht direkt durchgeführt werden, da die Proben nicht elektrisch leitend sind und auch unter dem besonderen VGP-Modus des REM nicht ohne starke statische Aufladungen beobachtet werden können. Deshalb wurden die Verbundwerkstoffe unter Luftabschluß pyrolysiert, da dadurch das RF-Aerogel in elektrisch leitfähiges C-Aerogel überführt werden kann. Damit verbunden sind aber starke Änderungen des gesamten Werkstoffaufbaus. Die Überführung eines RF-Aerogels in ein Kohlenstoffaerogel bedeutet eine Schrumpfung des Aerogels um fast 10 Prozent. Die Fasern werden ebenfalls pyrolysiert. Bei dem Pyrolyseprozeß entstehen Pyrolysegase, die aus dem Werkstoff entweichen müssen. Dadurch kann der ganze Werkstoff beschädigt oder auch zerrissen werden. Die Interpretation der nachfolgenden REM-Bilder ist deshalb schwierig und jede Übertragung auf die ursprünglichen RF-Aerogel-verbunde ist mit Vorsicht zu betrachten.

JUTE

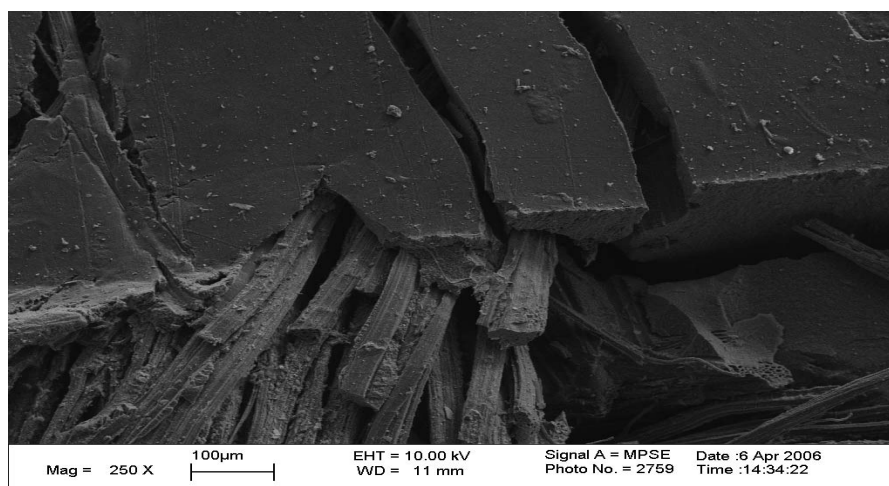


Abbildung 4.23: Jute Faser-Matrix-Haftung.

Der Ausschnitt des JUTE-FVW zeigt, dass große Aerogelblöcke neben Faseranhäufungen existieren. Das nachfolgende Bild zeigt, dass die Haftung an den Jutefasern wahrscheinlich gut war, insbesondere, da die Oberfläche der Jutefasern rau ist.

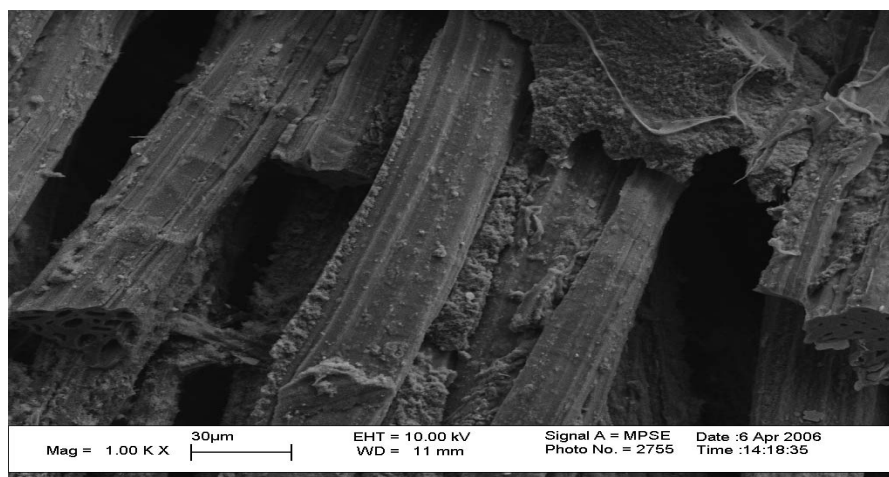


Abbildung 4.24: Jute Faser-Matrix-Haftung.

Auswertung und Diskussion der Ergebnisse

Die Fasern sind gut von der Matrix umschlossen und durch die raue Jute Oberflächen-topographie existiert eine zusätzliche Haftkraft, wodurch die Faser gehindert ist, sich von der Matrix zu lösen. Die Bruchfestigkeit eines spröden Werkstoffes steigt proportional zur Wurzel aus der Rauigkeit.

Baumwolle

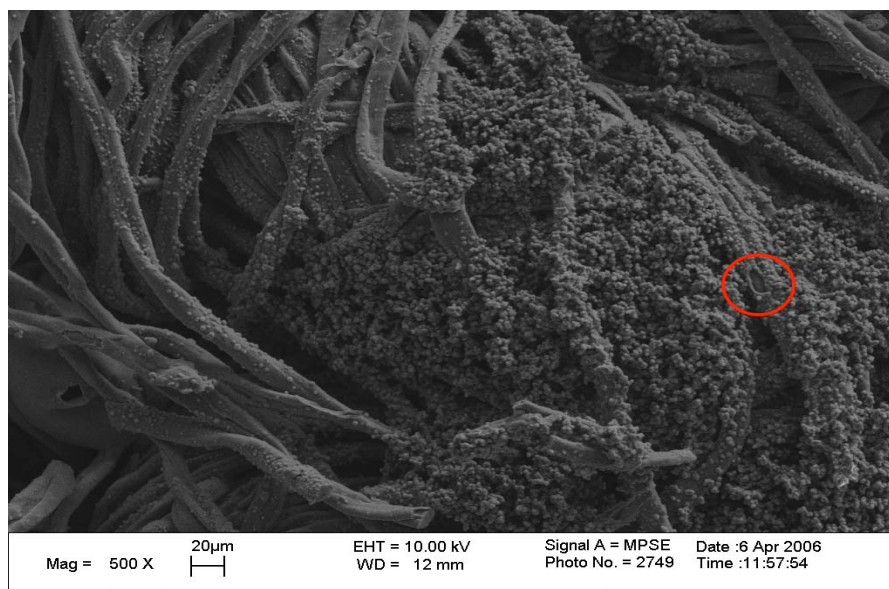


Abbildung 4.25: Baumwolle Faser-Matrix-Haftung.

Das Aerogel hat die Fasern wahrscheinlich gut benetzt. Hier ist insbesondere auf die eingekreiste Stelle zu achten, die zeigt, dass die Fasern von dem Aerogel ganz umgeben sind.

Hanf

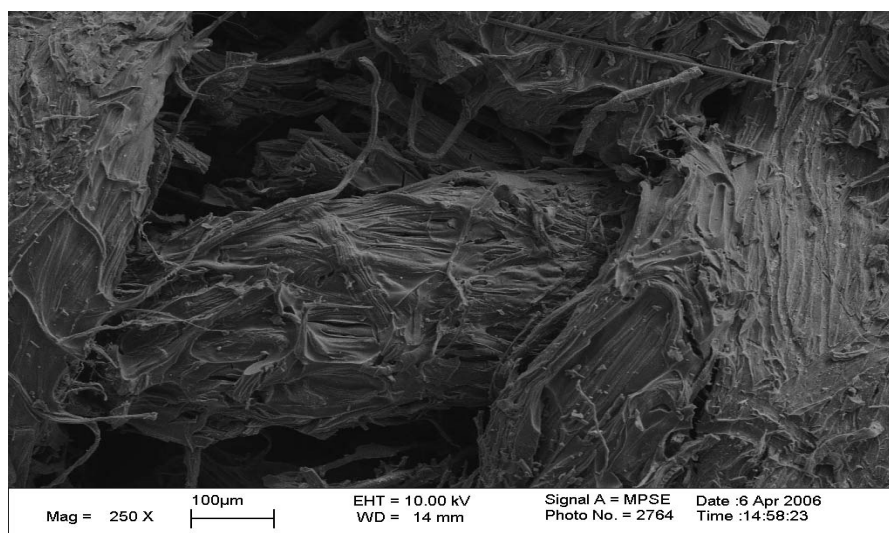


Abbildung 4.26: Hanffaser-Matrix-Haftung

Das RF-Aerogel hat die Fäden wie einen Schmierfilm umhüllt.

Auswertung und Diskussion der Ergebnisse

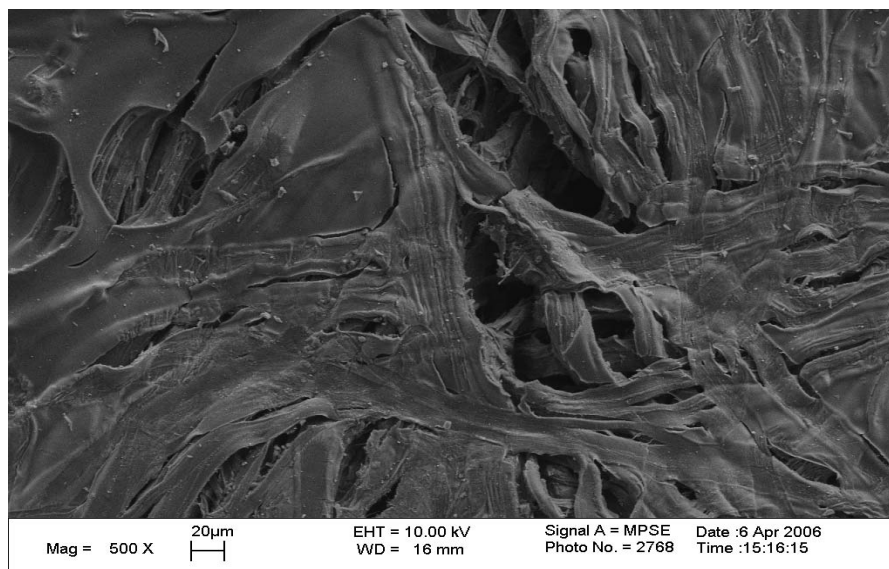


Abbildung 4.27: Hanffaser-Matrix-Haftung.

Die Fäden sind nahezu vollständig mit dem kompakten Aerogel bedeckt.

Aramid

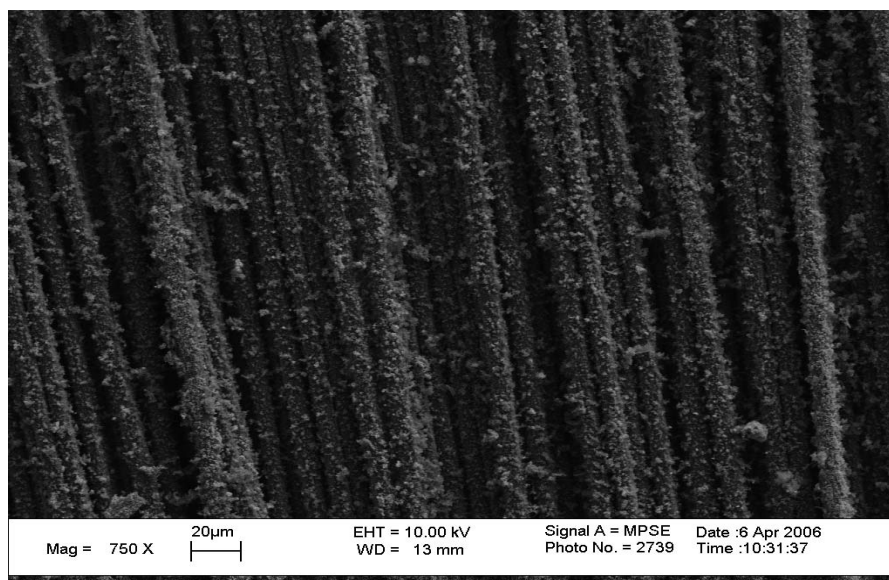


Abbildung 4.28: Aramid-Faser-Matrix-Haftung.

Die Fasern sind überall mit Aerogel umgeben, allerdings fehlt die Haftung zwischen den Fasern selbst, weil das Kohlenstoff-Aerogel die Fasern nicht benetzt. Ob dieser Zustand auch für den RF-Aerogel-Aramid-Werkstoff zutrifft, kann nicht gesagt werden. Die Aufnahme zeigt, dass das Kohlenstoffaerogel nicht als einheitlicher Stoff vorliegt, sondern als kleine Partikel. Dies könnte auch auf Restrukturierungsprozesse (Schrumpfung, Gasbildung) während des Pyrolyseprozesses zurück zu führen sein, so dass das Aerogel zerstört wurde.

Auswertung und Diskussion der Ergebnisse

CFK

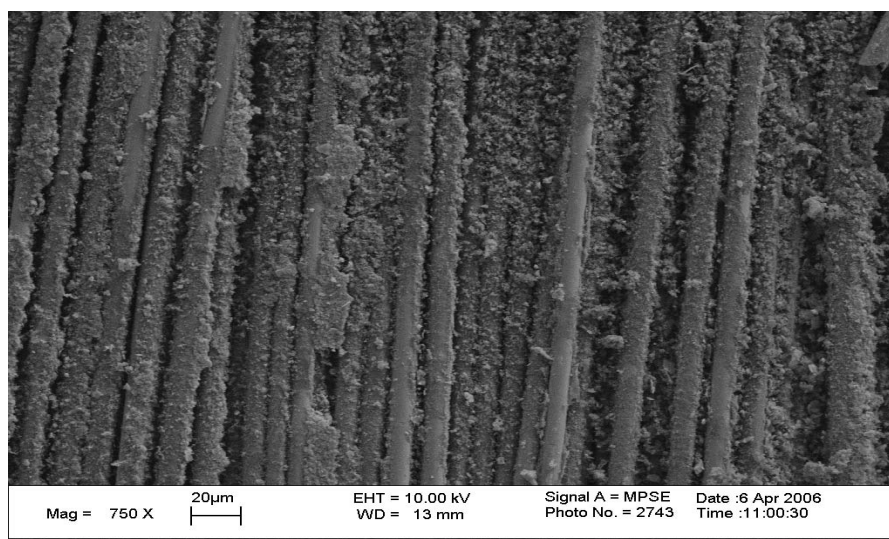


Abbildung 4.29. Kohlefaser-Matrix-Haftung.

Die Fasern sind auch nach der Pyrolyse gut benetzt vom Kohlenstoffaerogel. Im Gegensatz zum Aramid wurde hier nur die Matrix in Kohlenstoff umgewandelt, so dass die Schädigung des Werkstoffes nicht so groß ist. Aufgrund dieser Bilder wird vermutet, dass im originalen RF-Aerogelverbund das RF-Aerogel die Kohlefasern gut benetzt hat.

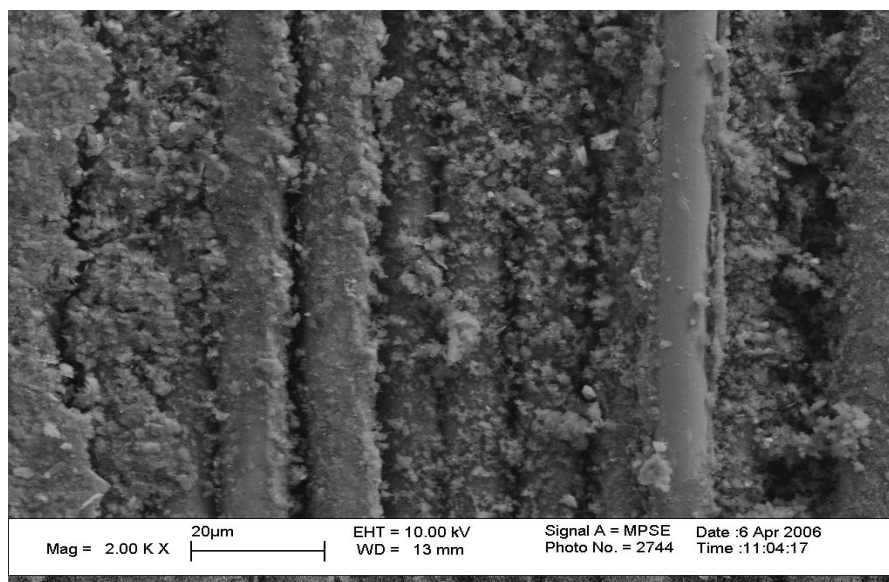


Abbildung 4.30: Kohlefaser-Matrix-Haftung.

5 Faser-Matrix-Aufnahmen

In diesem Kapitel werden senkrechte Schnitte durch das Laminat der Faserverbundproben mit einem Lichtmikroskop sichtbar dargestellt, um eine Aussage über die Faser-Matrix-Haftung im Verbund machen zu können. Dazu werden die Proben mittels Bandsäge durchgetrennt und anschließend die Schnittstelle mit Schleifpapier der Körnung 1000 geschliffen, um eine gute gerade Fläche zu erzeugen. Mit den Aufnahmen soll der Verbund zwischen Faser und Matrix dargestellt werden.

Naturfaserverbund

Jute-FVW

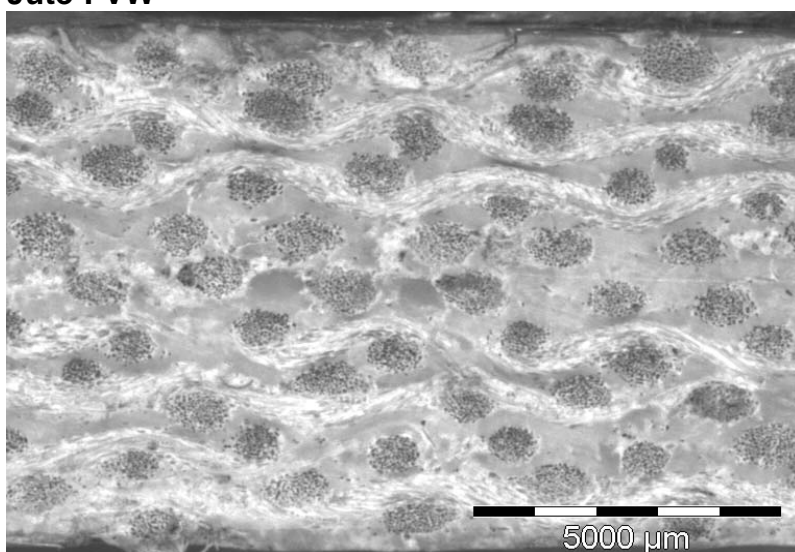


Abbildung 5.1: Schnittstelle von Jute-FVW.

Die Abbildung 5.1 zeigt eine Schnittstelle von einem Jute-FVW. In diesem Bild ist die Faser-Matrix Verteilung zu sehen. Zu erkennen ist auch die Webrichtung der Faser in Schuss- und Kettrichtung.

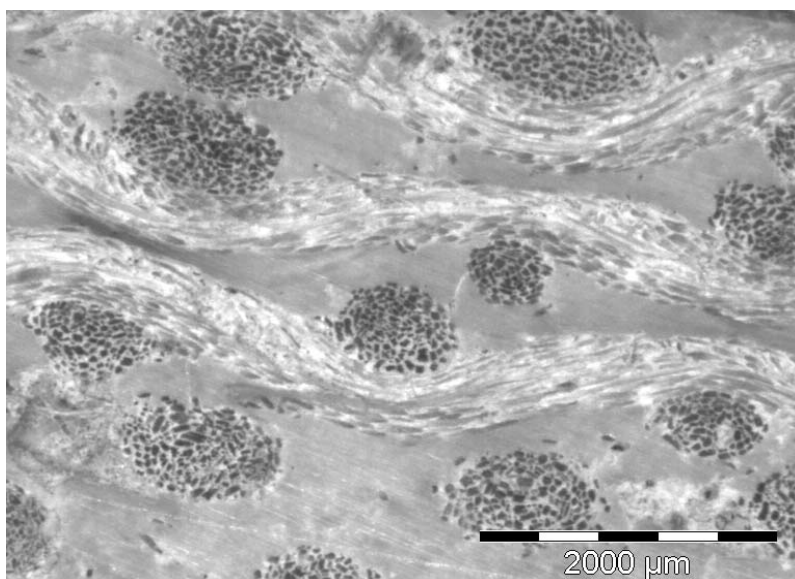


Abbildung 5.2: Schnittstelle von Jute-FVW.

Faser-Matrix-Aufnahmen

In Abbildung 5.2 ist die Matrix um das Garn dargestellt. In diesem Bild ist zusehen, wie die Matrix das ganze Garn vollständig in Schuss- und Kettrichtung ohne Freiräume umschlossen hat, dies spricht für eine gute Faser-Matrix-Haftung im Laminat.

Hanf-FVW

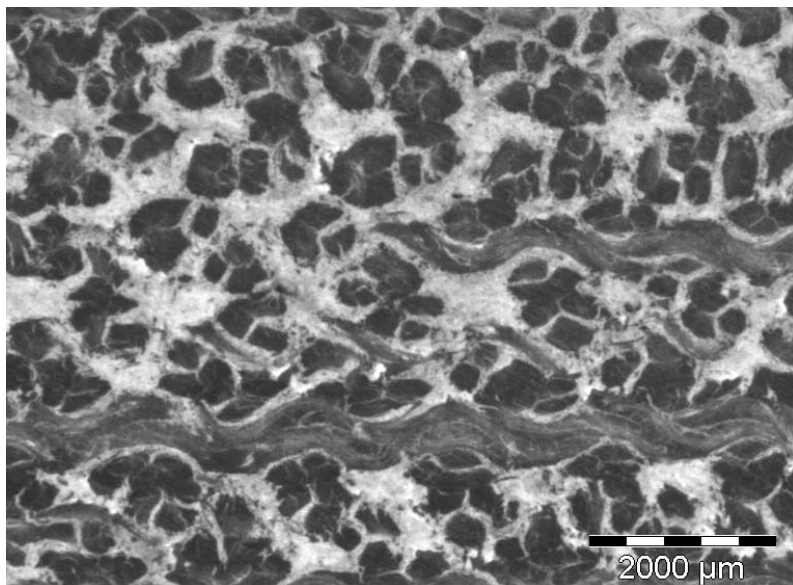


Abbildung 5.3: Schnittstelle von Hanf-FVW.

Die Abbildung 5.3 zeigt die Schichten von einem Laminat aus Hanf-FVW.

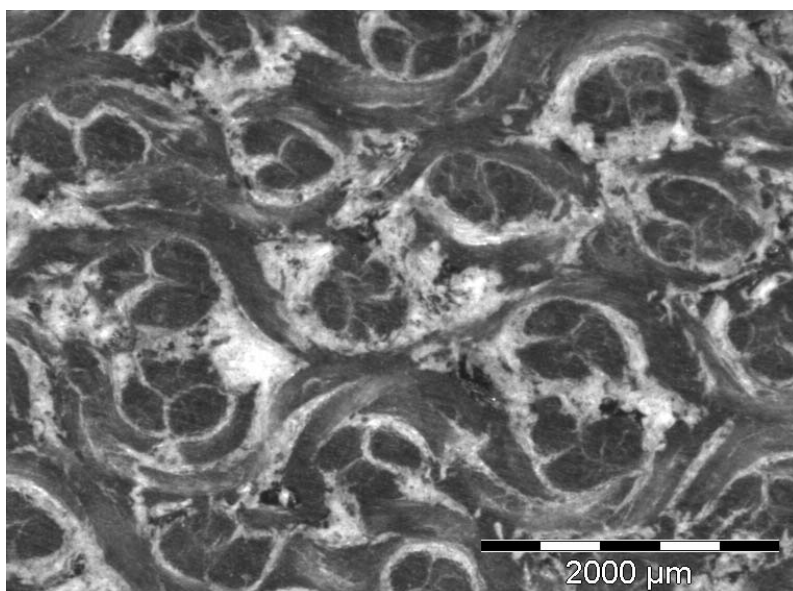


Abbildung 5.4: Schnittstelle von Hanf-FVW.

In Abbildung 5.4 ist die Hanf-Faser-Matrix dargestellt. Hierbei ist zu erkennen, welche Garnverzwirnung im Laminat vorliegt. Laut Hersteller handelt es sich, um einen Garntyp 10/3x2 Nm (numerisch metrisch) dabei bedeutet 3x2, dass ein Garn aus zwei verzwirnten Fäden besteht, wobei die einzelnen Garne selbst aus drei verzwirnten Fäden bestehen, die selbst ebenfalls zusammengezwirnt sind. Diese Verzwirnung ist auch in der Abbildung 5.4 zu erkennen. Was die Faser-Matrix-Haftung betrifft, hat sich das Aerogel gut in die Zwischenräume abgesetzt, so dass kaum Freiräume zu sehen sind.

Baumwolle-FVW

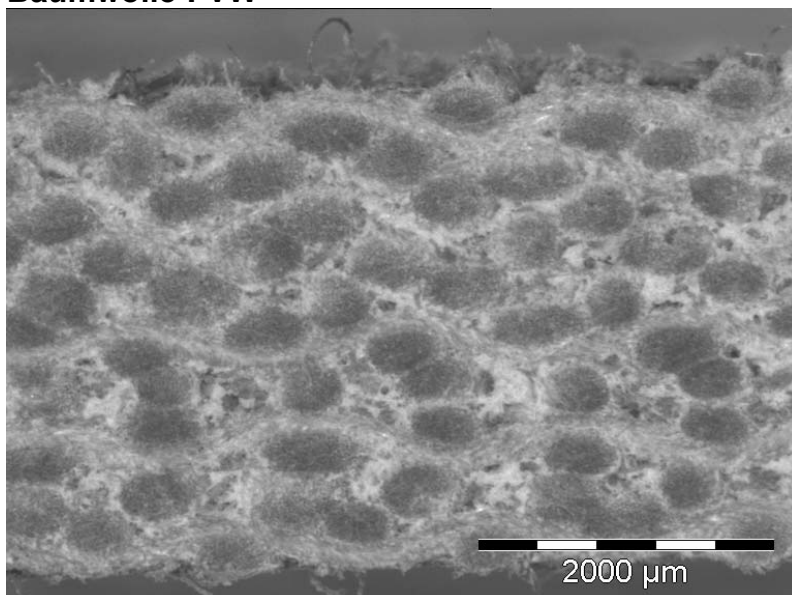


Abbildung 5.5: Schnittstelle von Baumwolle-FVW.

In der Abbildung 5.5 ist die Schnittstelle der Baumwolle-FVW dargestellt.

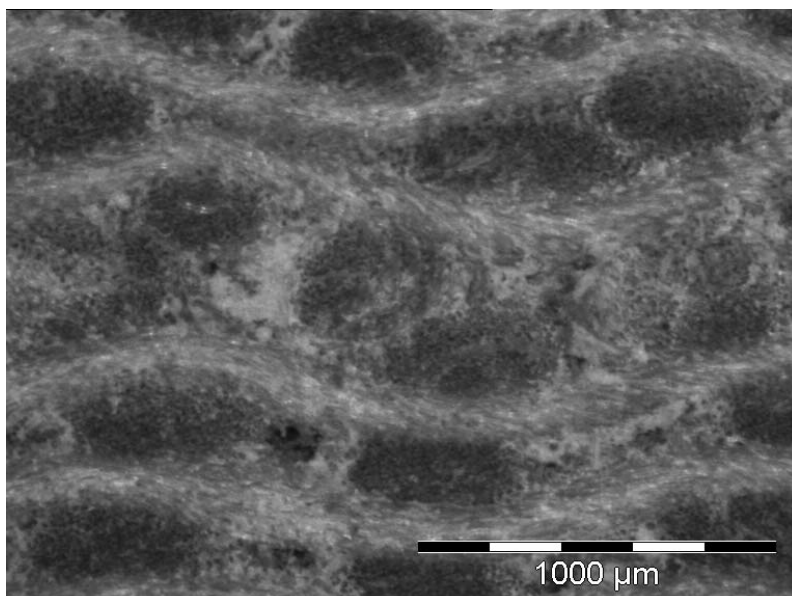


Abbildung 5.6: Schnittstelle von Baumwolle-FVW.

Die Abbildung 5.6 zeigt, wie die Matrix die Fasern benetzt hat. Zusehen sind auch einige Freistellen um das Garn, was heißt, dass das RF-Aerogel aufgrund der Verzwirnung der Baumwollfaser nicht vollständig in das Garn eindringen konnte.

Eine Darstellung auf der Aramid-FVW und der CFK in dieser Art ist nicht möglich, da sich keine glatten Schnittstellen herstellen lassen.

6 Diskussion und Zusammenfassung

Die hochwertigen mechanischen Eigenschaften von Natur-, Aramid- und Kohlefasern können nur dann als Bauteilverstärkung gewinnbringend genutzt werden, wenn es gelingt eine gute Haftung zwischen Faser und Matrix zu erzeugen. Für diese so genannte Grenzflächenqualität ist hauptsächlich die Geometrie der Faser, deren Struktur und deren Oberflächentopographie entscheidend. Bei den Naturfasern handelt es sich in diesem Zusammenhang um ein natürliches Produkt mit schwankender Rohstoffqualität.

6.1 Faserverbund mit RF-Aerogel

Naturfaserverbundwerkstoffe mit RF-Aerogel

Diese Arbeit hat gezeigt, dass alle Naturfasern eine speziell angepasste Behandlung mit RF-Aerogel als Matrixwerkstoff hinsichtlich der Konsistenz der RF-Lösung benötigen, um gute Resultate bei der Faser-Matrix-Haftung zu erreichen.

Naturfasergewebe sind deshalb so interessant, weil sie ein großes Potential haben mit dem RF-Aerogel als Matrixmaterial industriell eingesetzt zu werden. Sie bilden durch ihr geringes Eigengewicht eine gute Kombination, so dass sich Faserverbundbauteile mit niedrigen Dichten in der Größenordnung von 0,6-0,9 g/cm³ herstellen lassen.

Die Eigenschaft der niedrigen Wärmeleitfähigkeit, die den Einsatz als Isoliermaterial ermöglicht und die hohe Feuerbeständigkeit, wodurch der Verbundwerkstoff nicht brennbar ist, sind besonders hervorzuheben.

Außerdem ist das Material durch die Änderung der Fadendichte, des Flächengewichts und der Fadenanordnung der Gewebe, wie auch durch die Verweildauer im Trockenschrank leicht in der Steifigkeit sowie in der Festigkeit zu beeinflussen.

Aramid und CFK-Faserverbund mit RF-Aerogel

Die Aramid- und Kohlefasern sind in Kombination mit RF-Aerogel bis zu 50% leichter als die in häufig gefundener Faser-Matrix-Form mit Epoxyd- oder Phenolharzen.

Vergleicht man die Festigkeiten und die Faser-Matrix-Haftung, erzielen die epoxydharz- und die phenolharzgebundenen Werkstoffe gegenüber dem RF-Aerogelverbund bessere Ergebnisse.

Das RF-Aerogel zeichnet sich zusätzlich durch die hohe Temperaturbeständigkeit von 350°C aus. Epoxydharz erreicht dagegen nur eine Temperaturbeständigkeit von maximal 250°C. Ausserdem lässt sich das Aerogel unter Pyrolyse in Kohlenstoff umwandeln, wohingegen sich das Epoxydharz schon bei Temperaturen oberhalb von 300°C zersetzt. Diese Erkenntnisse sprechen dafür, dass das Aerogel als Matrixwerkstoff in Gebieten, wo herkömmliche Harze versagen ihren Einsatz finden kann.

Spezifische Festigkeiten

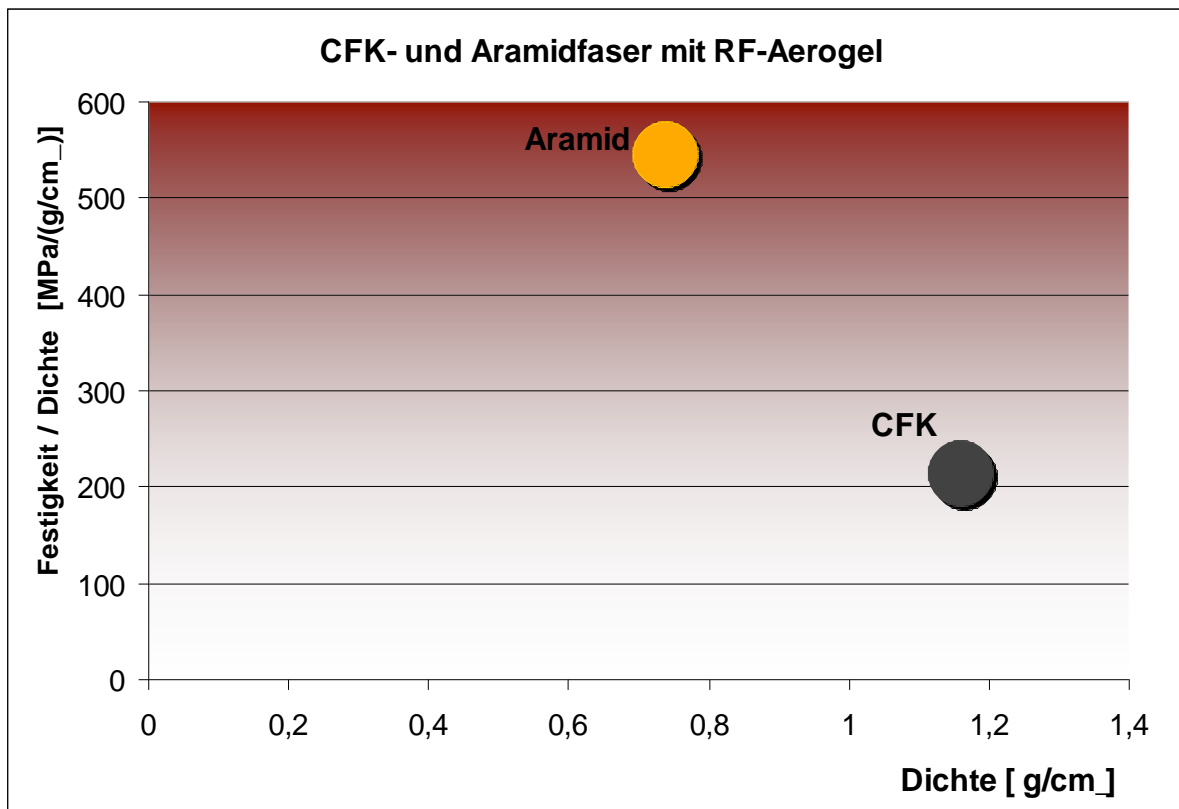


Abbildung 6.1: Darstellung der spezifischen Festigkeiten der Aramid und CFK-Verbundwerkstoffe.

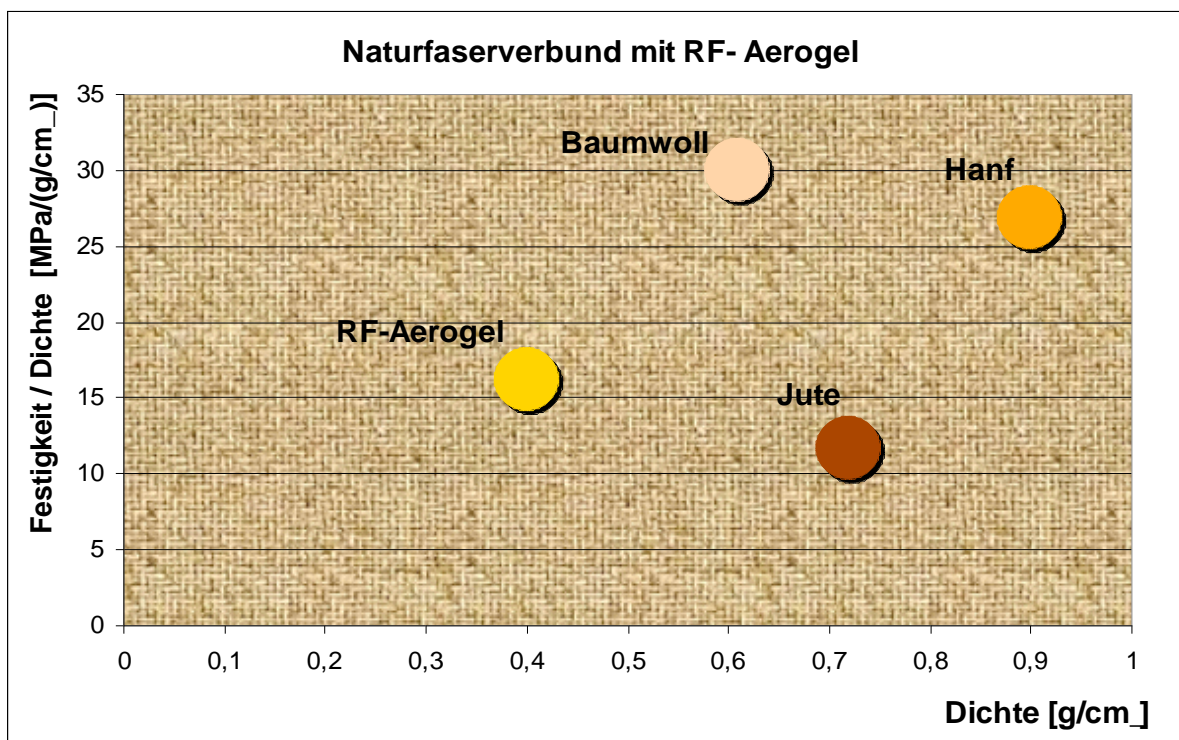


Abbildung 6.2: Darstellung der spezifischen Festigkeiten der Naturfaserverbundwerkstoffe mit RF-Aerogel.

Festigkeiten

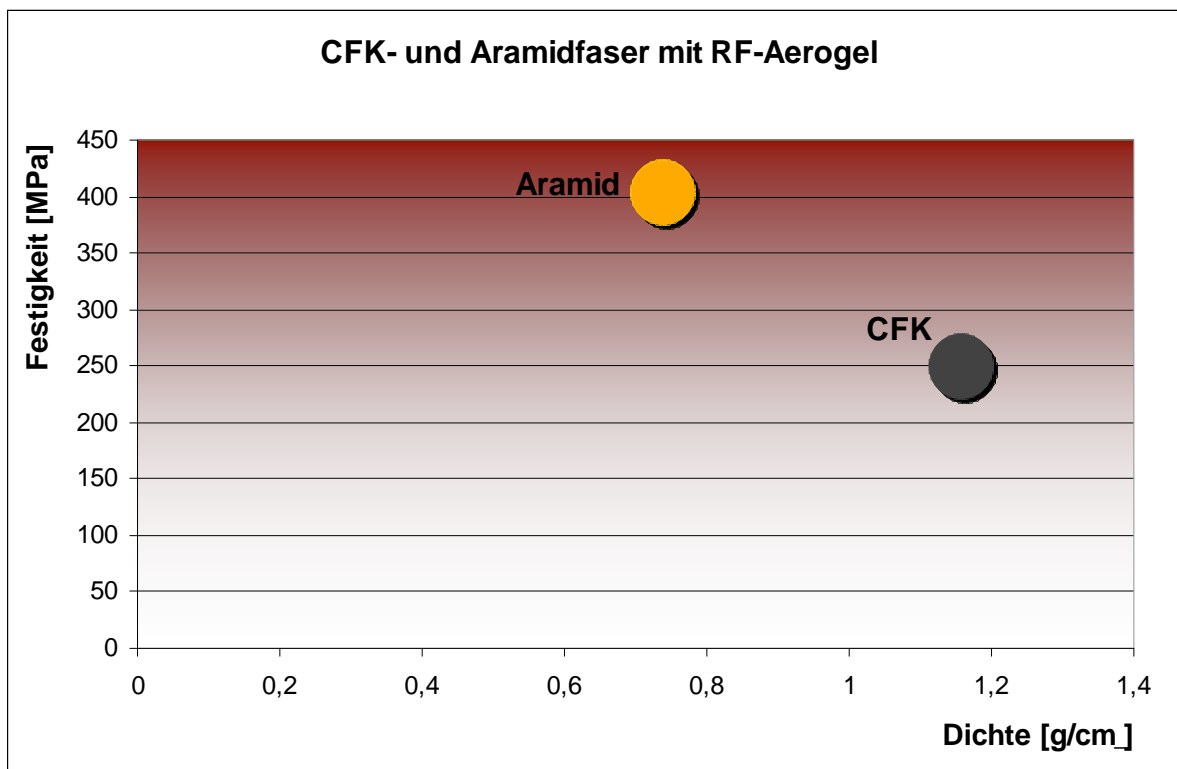


Abbildung 6.3: Darstellung der Festigkeiten der Aramid und CFK Verbundwerkstoffe.

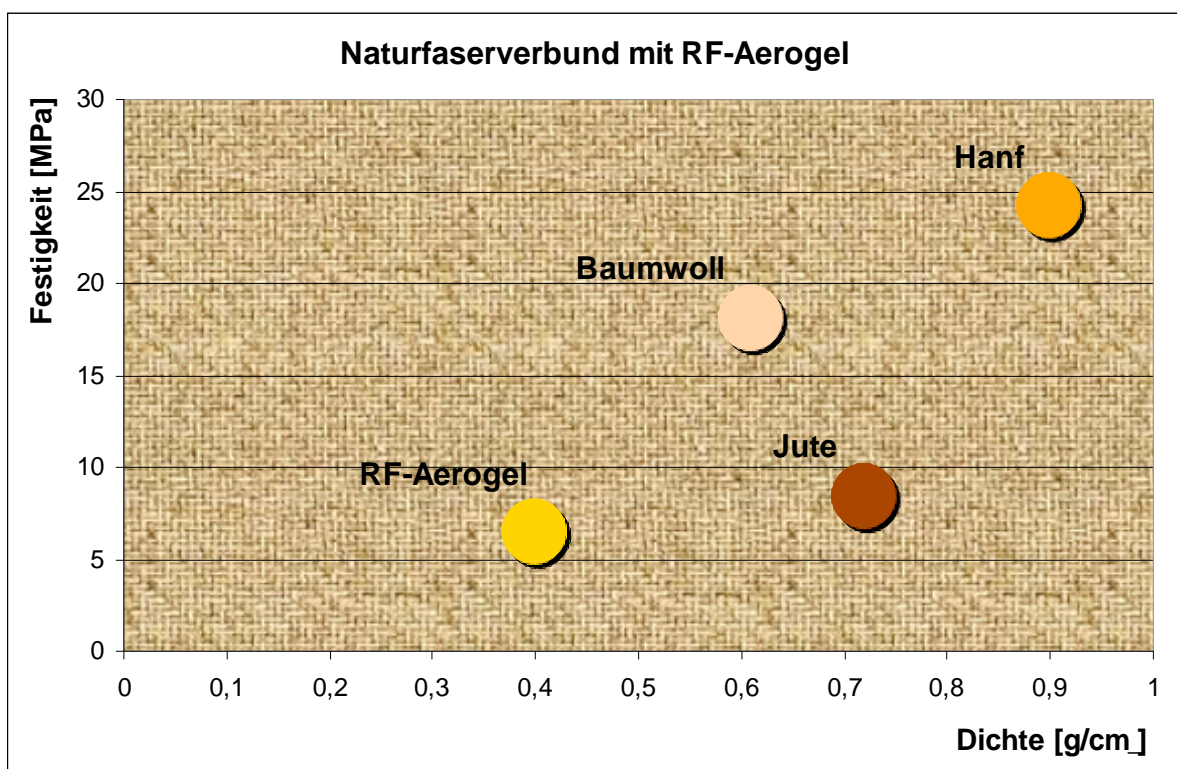


Abbildung 6.4: Darstellung der Festigkeiten der Naturfaserverbundwerkstoffe.

Diskussion und Zusammenfassung

Die in der Abbildung 6.1 und 6.3 dargestellten Punkte zeigen, dass der Aramid-FVW gegenüber dem CFK sowohl in der Festigkeit als auch in der spezifischen Festigkeit überlegen ist. Wird die Festigkeit der Faser alleine betrachtet, ist die Kohlefaser der Aramidfaser um ein Vielfaches überlegen. Dennoch zeigt die Aramidfaser im Verbund mit dem RF-Aerogel weitaus höhere Festigkeiten auf als CFK. Dies deutet in diesem Fall daraufhin, dass die Faser-Matrix-Haftung bei Aramidfaser mit dem RF-Aerogel aufgrund der besseren Benetzung der RF-Lösung bei der Herstellung besser ist als mit Kohlefaser.

Diese Erkenntnis, dass die Haftung auf Aramidfaser besser gelungen ist als auf Kohlefaser, wodurch auch höhere Kräfte aufgenommen werden können, zeigt, dass sich die Oberflächenbeschaffenheit der Aramidfaser gegenüber dem RF-Aerogel besser anbietet als die Oberflächenbeschaffenheit der Kohlefaser. Obwohl die Benetzung mit dem REM betrachtet (siehe Abbildung: 4.30 und 4.33) bei beiden fast identisch aussieht, zeigt die Abbildung 5.1, dass das RF-Aerogel bei Aramidfaser besser benetzt sein muss als mit Kohlefaser.

In Abbildung 6.2 sind die spezifischen Festigkeiten der Naturfaserverbundwerkstoffe dargestellt. Der Baumwoll-FVW dominiert in der spezifischen Festigkeit. Das Resultat, dass der Baumwoll-FVW höhere spezifische Festigkeit aufweist als die Jute- oder Hanf-FVW liegt daran, dass auf der Baumwollfaser RF-Aerogele mit der Dichte von $0,4 \text{ g/cm}^3$ gebildet haben und die Faser damit nahezu vollständig benetzt hat (siehe Abbildung 4.26). Dieses Ergebnis, dass der Baumwoll-FVW diese hohe spezifische Festigkeit erzielen konnte, liegt nicht nur einzig allein daran, dass sich RF-Aerogel auf der Faser gebildet hat, sondern dass die Baumwollfaser von Natur aus saugfreudig ist und sich mit dem ungelierten RF-Lösung voll saugen konnte bis zu 65% des Eigengewichts und somit für eine ausreichende Faser-Matrix-Haftung gesorgt hat, nachdem das ganze auf der Faser zur RF-Aerogel polykondensiert ist. Der Hanf-FVW zeigt seine Stärke erst bei der Festigkeit, da die Hanffaser reißfester ist als Jute- und Baumwollfaser. Allerdings muss gesagt werden, dass sich auf der Faser eine ungenau definierbares RF-Aerogel gebildet hat, das auf jeden Fall eine höhere Dichte hat als $0,4 \text{ g/cm}^3$, was dazu geführt hat, dass der Hanf-FVW schwerer wurde. Trotzdem kann der Hanf-FVW mit RF-Aerogel als Matrixwerkstoff mit einer Dichte von $0,9 \text{ g/cm}^3$ immer noch als ein leichter und fester Werkstoff mit einer Festigkeit von ungefähr 26 MPa betrachtet werden. Die Festigkeit, wie auch die spezifische Festigkeit der Jute-FVW liegt unterhalb derer von den anderen Naturfaserverbund-Werkstoffen.

Das reine RF Aerogel zeigt seine Überlegenheit in der Festigkeit nur gegenüber dem Jute-FVW in der spezifischen Festigkeit (siehe Abbildung: 6.2 und 6.4).

7 Literaturverzeichnis

- [1] J. Fricke.: Aerogels, Springer, Berlin, 1986
- [2] J. Schlichting, G. Elssner, K.H. Grünthaler, W. Günther, D. Kehr, G. Niederstadt, P.R.Sahm, Dr.D. Stöckel in: Verbundwerkstoffe, Grundlagen und Anwendung, Grafenau, Lexika,1978.
- [3] H.G. Haldenwanger :Hochleistungs-Faserverbundwerkstoffe im Automobilbau,VDI-Verlag, Düsseldorf, 1993.
- [4] H.P. Degischer.: Verbundwerkstoffe, 14.Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde,WILEY-VCH, Weinheim,2003.
- [5] D. Voss, Charakterisierung eines neuen, entgasungsarmen und verbrennbaren Formstoffes für Gießereianwendung: Kohlenstoff Aerosande, Dissertation, RWTH Aachen 2004
- [6] S. Brueck, Aerosande- ein neuer Formstoff für Gießereianwendungen, Dissertation, RWTH Aachen 2003.
- [7] G. Nonhoff, Praktikumskript zur 3-Punktbiegung. Biegeschwingversuch, Zugversuch, Biegebruch- und Zugbruchversuch an Rechteckproben GFK, FH – Aachen, 2004.
- [8] G. Nonhoff, Formelsammlung Faserverbund und Strukturen, FH-Aachen, 2003.
- [9] U.Pohl, Herstellung und Charakterisierung von ultraleichten Aerogel-Verbundwerkstoffen, Diplomarbeit, FH-Aachen,2004.
- [10] E.G. Paland, Technisches Taschenbuch, INA, Herzogenaurach, 1998.
- [11] BGIA, Gefahrenstoffinformationssystem der gewerblichen Berufsgenossenschaften Formaldehyd, Resorcin und Natriumcarbonat.
- [12] K. Schulte, Faserverbundwerkstoffe mit Polymermatrix –Aufbau und Mechanische Eigenschaften-, DLR Institut für Werkstoff-Forschung Köln, Forschungsbericht 1991.
- [13] A. Heydemeyer, R. Menger, Untersuchung des Verhaltens unidirektional naturfaserverstärkter Verbundwerkstoffe, DLR Interner Bericht IB 131 -95 /32,1995.

Literatur

- [14] Innovative Energiespeicher auf Basis von Kohlenstoffnanostrukturen. ZAE Bayern-Report Nr.0303-3, Würzburg, 2003.
- [15] <http://gonzo.uni-weimar.de/~fomekk/KunststoffdesignSS03/Vortrag030521.pdf>
- [16] J. Thiel, Kinetik des Sol-Gel Übergangs in wässrigen Resorcin / Formaldehydlösungen, Diplomarbeit, FH Aachen 2001.
- [17] G. Geiss, Einfluss von Tieftemperatur und Wasserstoff auf das Versagensverhalten von Glasfaser – Verbundwerkstoffen unter statischer und zyklischer Belastung, Dissertation, Universität Karlsruhe, 2000.
- [18] P.W. Atkins, J.A. Beran, Chemie einfach alles, VCH, Weinheim, 1996.
- [19] R & G Handbuch Faserverbundwerkstoffe Ausgabe 2003.
- [20] B. Baums, Flugzeugbau und Entwicklung, Vorlesungsskript, FH-Aachen, 2003.
- [21] <http://inaro.de/Deutsch/ROHSTOFF/industrie/FASER/mechkenn.htm>
- [22] C. Simon, Herstellung und Charakterisierung von C-Aeromats, Diplomarbeit, FH-Aachen, 2006.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kennwerte der Naturfasern.....	5
Tabelle 2: Kennwerte der Harze	6
Tabelle 3: Übersicht Naturfasergewebe.....	18
Tabelle 4: Übersicht synthetische Fasern.....	19

Abbildungsverzeichnis

Stand der Technik

Abbildung 2.1: Rumpf aus Kohlefaser.....	3
Abbildung 2.2: Vordere Rumpfsektion aus Kohlefaser.....	3
Abbildung 2.3: Aramidfaser- Einlage im Fahrradreifen.....	3
Abbildung 2.4: Flugzeugnase (Radome) aus Glasfaser.....	3
Abbildung 2.5: Kennwerte der Fasern.....	4
Abbildung 2.6: Spannung-Dehnung-Diagramm der Fasern.....	4
Abbildung 2.7: Festigkeitswerte der Naturfasern.....	6
Abbildung 2.8: Kennwerte der Naturfasern.....	6
Abbildung 2.9: Handlegeverfahren von Laminaten.....	7
Abbildung 2.10: Darstellung der verschiedenen Übergangsphasen.....	9
Abbildung 2.11: Oberflächenspannungen beim Trocknen an der Luft.....	10
Abbildung 2.12: Einfluss der Katalysatoranteile auf die Dichte.....	12
Abbildung 2.13: Pyrolyseofen F150 500/13 der Firma Gero.....	12
Abbildung 2.14: REM- Aufnahme eines Kohlenstoff-Aerogels.....	13

Praktisches Arbeiten

Abbildung 3.1: Verwendete Chemikalien.....	14
Abbildung 3.2: Unterschiedliche RF-Aerogele.....	15
Abbildung 3.3: Form und Deckel für das Laminieren.....	16
Abbildung 3.4: Form und Deckel aus Stahl, Aluminium und Edelstahl.....	17
Abbildung 3.5: Naturfasergewebe.....	18
Abbildung 3.6: CFK und Aramidgewebe.....	19
Abbildung 3.7: Faserverbundwerkstoff Proben.....	21
Abbildung 3.8: Kohlefaser mit Epoxydharz imprägniert.....	21
Abbildung 3.9: REM Aufnahme von pyrolysierten Kohlefasern bei 700°C.....	21
Abbildung 3.10: REM Aufnahme von pyrolysierten Kohlefasern bei 700°C.....	21
Abbildung 3.11: Prüfmaschine für das 3-P-B.....	23
Abbildung 3.12: Schmatische Darstellung des Kraft-Wegs Diagramms.....	24
Abbildung 3.13: Zeichnerische Ermittlung von E- und G-Modul.....	25
Abbildung 3.14: RF- Aerogel- FVW Zug-Bruch-Proben.....	26
Abbildung 3.15: Zugprüfmaschine von Instron.....	26

Auswertung und Diskussion der Ergebnisse

Abbildung 4.1: Diagramm des Biegebruchversuchs am reinen RF-Aerogel.....	28
Abbildung 4.2: Reines RF-Aerogel bei der 3PB.....	29
Abbildung 4.3: 3-P-B Diagramm der Jute FVW	29
Abbildung 4.4: 3-P-B drei Proben im elastischen Bereich belastet.....	30
Abbildung 4.5: 3-P-B Diagramme zur Bestimmung des E-Moduls und Schubmoduls G.....	30
Abbildung 4.6: 3-P-B Diagramm der Baumwolle FVW.....	31
Abbildung 4.7: 3-P-B drei Proben im elastischen Bereich belastet.....	31
Abbildung 4.8: 3-P-B Diagramme zur Bestimmung des E-Moduls und Schubmoduls G.....	32
Abbildung 4.9: 3-P-B Diagramm von Hanf- FVW.....	32
Abbildung 4.10: 3-P-B im elastischen Bereich belastet.....	33
Abbildung 4.11: 3-P-B Diagramme zur Bestimmung des E-Moduls und Schubmoduls G.....	33

Abbildungsverzeichnis

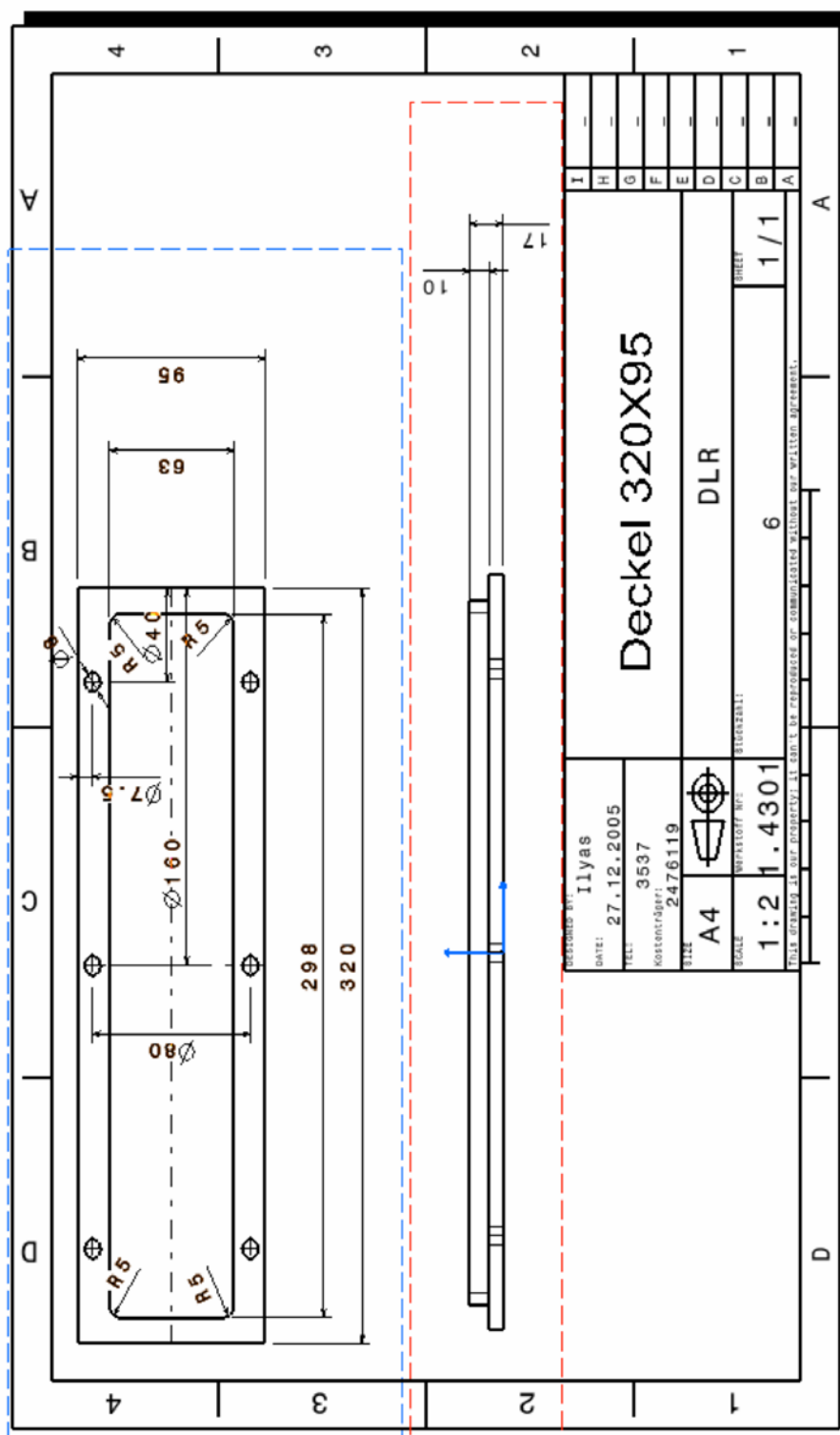
Abbildung 4.12: 3-P-B Diagramm von CFK- FVW.....	34
Abbildung 4.13: 3-P-B im elastischen Bereich belastet.....	34
Abbildung 4.14: 3-P-B Diagramme zur Bestimmung des E-Moduls und Schubmoduls G.....	35
Abbildung 4.15: 3-P-B Diagramm von Aramid- FVW.....	35
Abbildung 4.16: 3-P-B im elastischen Bereich belastet.....	36
Abbildung 4.17: 3-P-B Diagramme zur Bestimmung des E-Moduls und Schubmoduls G.....	36
Abbildung 4.18: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Aerogel- Jute- FVW.....	37
Abbildung 4.19: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Aerogel- Baumwolle- FVW.....	37
Abbildung 4.20: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Aerogel- Hanf- FVW.....	38
Abbildung 4.21: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Aerogel- Aramid- FVW.....	38
Abbildung 4.22: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Aerogel- CFK- FVW.....	39
Abbildung 4.23: Jute Faser-Matrix-Haftung.....	40
Abbildung 4.24: Jute Faser-Matrix-Haftung.....	40
Abbildung 4.25: Baumwolle Faser-Matrix-Haftung.....	41
Abbildung 4.26: Hanffaser-Matrix-Haftung.....	41
Abbildung 4.27: Hanffaser-Matrix-Haftung.....	42
Abbildung 4.28: Aramid Faser-Matrix-Haftung.....	42
Abbildung 4.29: Kohlefaser-Matrix-Haftung.....	43
Abbildung 4.30: Kohlefaser-Matrix-Haftung.....	43

Faser-Matrix-Aufnahmen

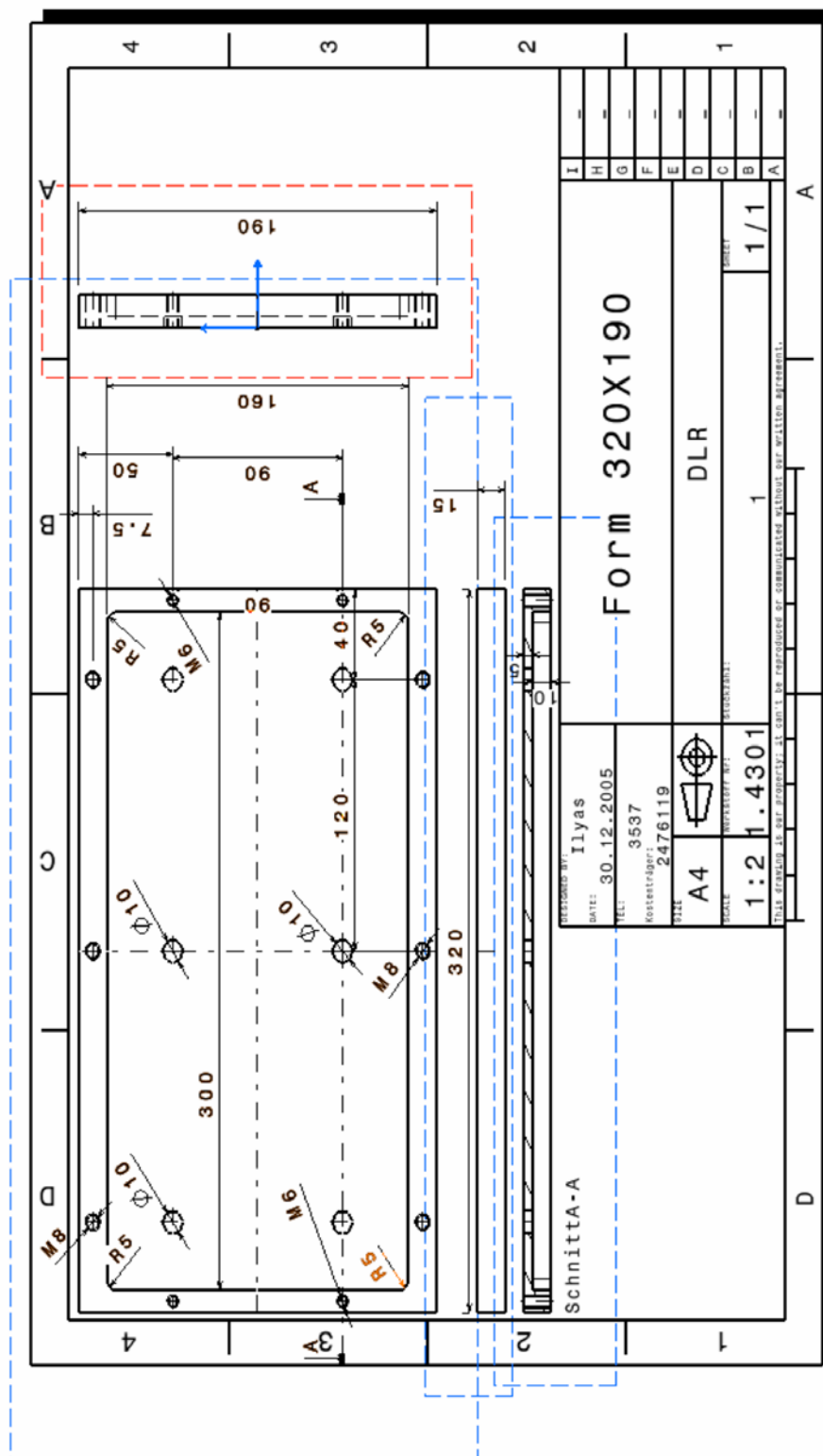
Abbildung 5.1: Schnittstelle von Jute-FVW.....	44
Abbildung 5.2: Schnittstelle von Jute-FVW.....	44
Abbildung 5.3: Schnittstelle von Hanf-FVW.....	45
Abbildung 5.4: Schnittstelle von Hanf-FVW.....	45
Abbildung 5.5: Schnittstelle von Baumwolle-FVW.....	46
Abbildung 5.5: Schnittstelle von Baumwolle-FVW.....	46

Diskussion und Zusammenfassung

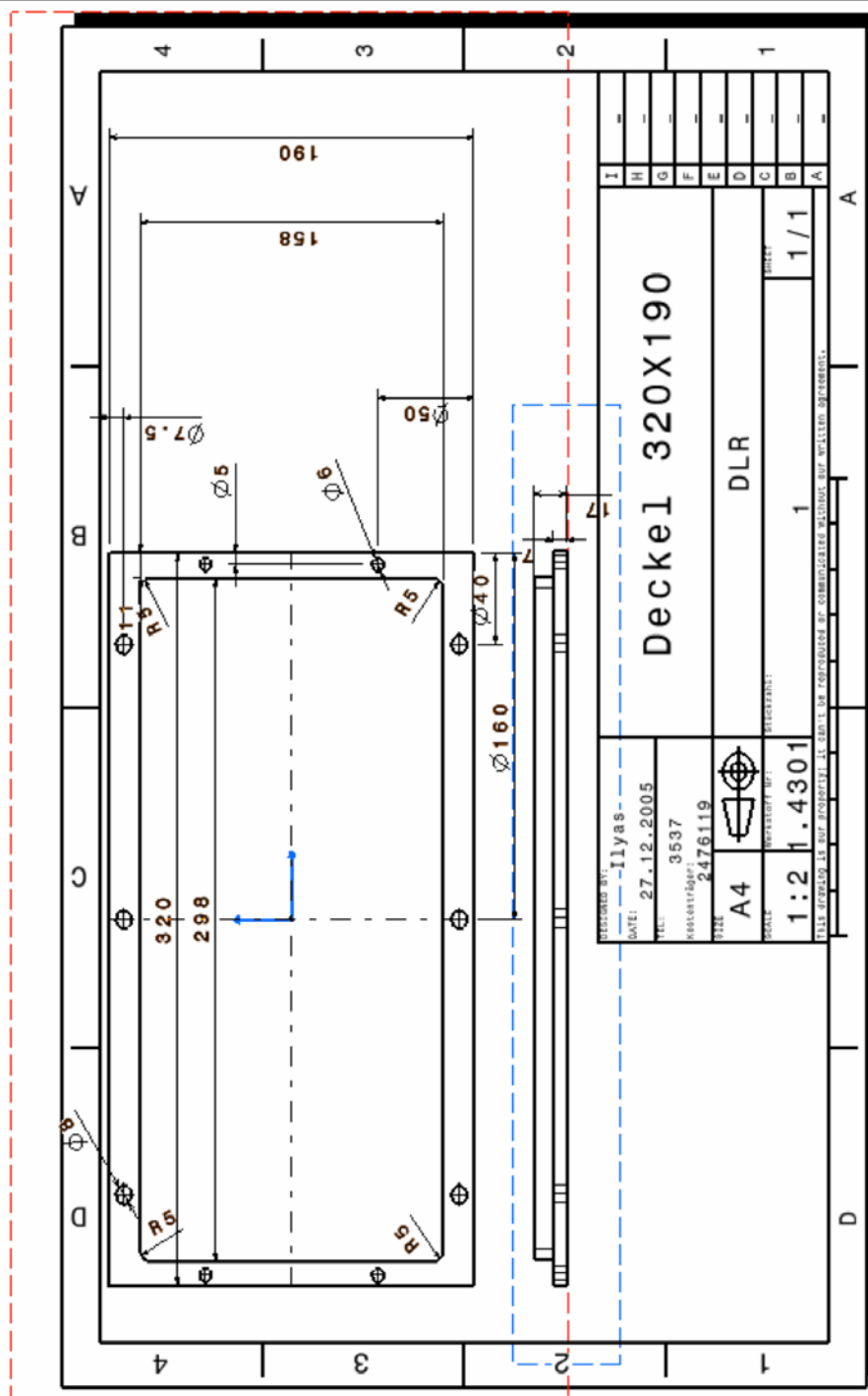
Abbildung 6.1: Darstellung der spezifischen Festigkeiten der Aramid und CFK-Verbundwerkstoffe.....	48
Abbildung 6.2: Darstellung der spezifischen Festigkeiten der Naturfaserverbundwerkstoffe mit RF-Aerogel.....	48
Abbildung 6.3: Darstellung der Festigkeiten der Aramid und CFK-Verbundwerkstoffe.....	49
Abbildung 6.4: Darstellung der Festigkeiten der Naturfaserverbundwerkstoffe mit RF-Aerogel.....	49



Anhang



Anhang



Anhang

8.2 Beispielrechnungen

Drei-Punkt-Biegung ohne Schubeinfluss

Probenname	Dicke t [mm]	Breite b [mm]	Auflager- abstand L _{Aufl.3} [mm]	Kraft F ₃ [N]	Absenkung w ₃ [mm]	Biegesteifigkeit B [Nmm]	Elastizitätsmodul E [N/mm ²]
UPJ01	8	20,2	80	10	0,45	11734,50	275

$$E = \frac{L^3 \Delta F}{48 L \Delta w} \quad (3.4 - 1)$$

Mit

$$I_y = \frac{b t^3}{12} \quad (3.4 - 3)$$

Biegesteifigkeit wird zu:

$$B = \frac{L^3 \Delta F}{48 b \Delta w} \quad (3.4 - 4)$$

$$I = \frac{20,2 \cdot 8^3}{12}$$

$$I = 861,867 \text{ mm}^4$$

$$B = \frac{80^3 \cdot 10}{48 \cdot 20,2 \cdot 0,45}$$

$$B = 11734,506 \text{ Nmm}$$

$$E = \frac{80^3 \cdot 10}{48 \cdot 861,867 \cdot 0,45}$$

$$E = 275 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Drei-Punkt-Biegung mit Schubeinfluss

Probenname	l _{Aufl.1} [mm]	F ₁ [N]	w ₁ [mm]	l _{Aufl.2} [mm]	F ₂ [N]	w ₂ [mm]	l _{Aufl.3} [mm]	F ₃ [N]	w ₃ [mm]	B [Nmm]	G [N/mm ²] Diagramm	E [N/mm ²] Diagramm
UPJ01	40	30	0,53	60	20	0,44	80	10	0,45	8532	15,2	357

$$\sum B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n=3} \frac{L_i^3 F_i}{48 b_i w_i} \quad (7.2 - 1)$$

$$B = \frac{1}{3} \left(\left(\frac{40^3 \cdot 30}{48 \cdot 20,2 \cdot 0,53} \right) + \left(\frac{60^3 \cdot 20}{48 \cdot 20,2 \cdot 0,44} \right) + \left(\frac{80^3 \cdot 10}{48 \cdot 20,2 \cdot 0,45} \right) \right)$$

$$B = 8532 \text{ Nmm}$$

Anhang

$$w = \frac{F L^3}{48 E I_y} + \frac{k F L}{4 G A} \quad (3.4 - 5)$$

Durch umformen :

$$\frac{4 w b t}{F L} = \frac{1}{E} \left(\frac{l}{t}\right)^3 + \frac{k}{G} \quad (3.4 - 6)$$

Geradengleichung :

$$Y = mx + b$$

$$Y = \text{Achse} = \frac{4 w b t}{F L}$$

$$X = \text{Achse} = \left(\frac{l}{t}\right)^3$$

1.Punkt

$$Y_1 = \frac{4 \cdot 0,53 \cdot 20,2 \cdot 8}{30 \cdot 40}$$

$$Y_1 = 0,2854$$

$$X_1 = \left(\frac{40}{8}\right)^3$$

$$X_1 = 25$$

2.Punkt

$$Y_2 = \frac{4 \cdot 0,44 \cdot 20,2 \cdot 8}{20 \cdot 60}$$

$$Y_2 = 0,23701$$

$$X_2 = \left(\frac{60}{8}\right)^3$$

$$X_2 = 56,25$$

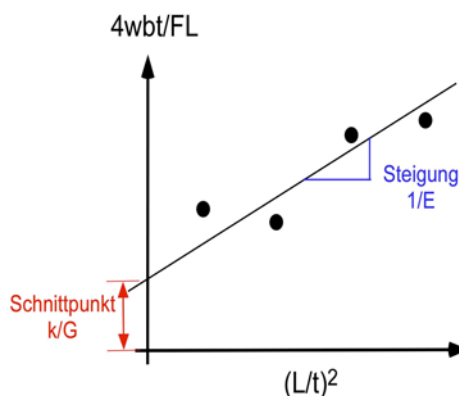
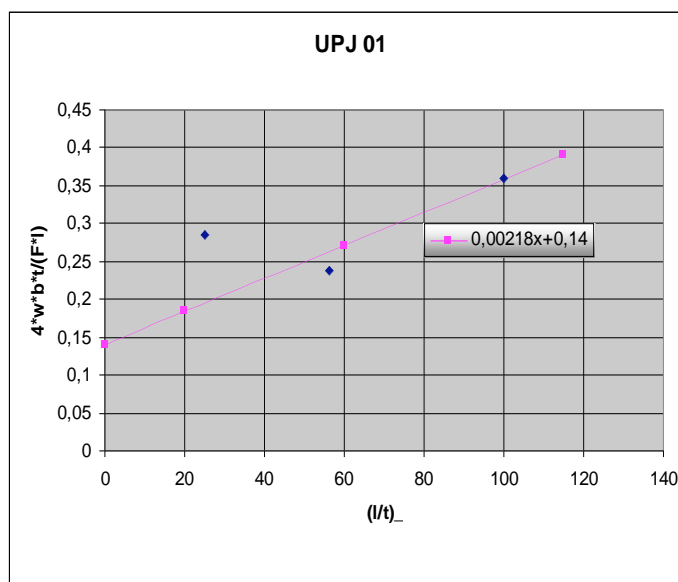
3.Punkt

$$Y_3 = \frac{4 \cdot 0,45 \cdot 20,2 \cdot 8}{10 \cdot 80}$$

$$Y_3 = 0,3636$$

$$X_3 = \left(\frac{80}{8}\right)^3$$

$$X_3 = 100$$



Schubmodul G lässt sich aus dem Schnittpunkt mit der Y-Achse berechnen oder aus der Ausgleichsgerade $Y=0,0028x+0,0789$ bei $x=0$, durch Einsetzen erhalten wir dann $Y=0,0789$ mit $k \approx 1,2$ (Schubkonstante bei Biegung) erhalten wir mit $k / G = 0,0789$ somit für $G=15,2$ N/mm² und aus der Steigung $0,0028 = 1/E$ erhalten wir $E = 357,14$ N/mm².

Anhang

Biegebruchversuch

Probenname (10 Lagig)	Dicke t [mm]	Breite b [mm]	Auflager- abstand l _{Auflagerab.3} [mm]	Kraft F _{max} [N]	Bruchmoment m [Nmm/mm]	Biegebruchspannung σ _B [MPa]
UPE Probe (RF-Aerogel)	14,1	14,1	40	150,82	106,86	6,4562

Biegebruchspannung

$$\sigma_B = \frac{3 F_{\max} L_{\text{Aufl.}}}{2 b t^2} \quad (7.2 - 2)$$

Bruchmoment

$$m = \frac{F_{\max} L_{\text{Aufl.}}}{4 b} \quad (7.2 - 3)$$

$$\sigma_B = \frac{3 \cdot 150,82 \cdot 40}{2 \cdot 14,1 \cdot 14,1}$$

$$\sigma_B = 6,4562 \text{ MPa}$$

$$m = \frac{150,82 \cdot 40}{4 \cdot 14,1}$$

$$m = 106,86 \frac{\text{Nmm}}{\text{mm}}$$

Zugversuch:

Probenname	t [mm]	b [mm]	l ₀ [mm]	Δε [-]	ΔF [kN]	D [N/mm]	E _z [N/mm ²]
ZBH01	4	18	50	0,00296386	0,163959	3073,30	768,32

Zug - E - Modul

$$E_z = \frac{\Delta F}{b t \Delta \epsilon} \quad (3.4 - 10)$$

Dehnung

$$\Delta \epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3.4 - 11)$$

Dehnsteifigkeit

$$D = \frac{\Delta F}{b \Delta \epsilon} \quad (3.4 - 12)$$

$$E_z = \frac{0,163959 \cdot 10^3}{18 \cdot 4 \cdot 0,00296386}$$

$$E_z = 768,32 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Anhang

Zugbruchversuch

Probenname	t [mm]	b [mm]	F _{max} [N]	n [N/mm]	σ _{zB} [N/mm ²]
ZBH01	4	18	1740	96,67	24,166

Zug – Bruchspannung

$$\sigma_{zB} = \frac{F_{\max}}{b \cdot t} \quad (3.4 - 13)$$

Bruchschnittlast

$$n = \frac{F_{\max}}{b} \quad (3.4 - 14)$$

$$\sigma_{zB} = \frac{1740}{18 \cdot 4}$$

$$\sigma_{zB} = 24,166 \frac{N}{mm^2}$$

$$n = \frac{1740}{18}$$

$$n = 96,67 \frac{N}{mm}$$

Berechnung des Faservolumenanteils aus der Dicke

Probe ZBB01

- I. Dicke des Laminats $t = 3,2 \text{ mm}$
- II. Flächengewicht $G = 155 \cdot 10^{-6} \text{ g/mm}^2$
- III. Gesamtflächengewicht $m = 1,8967 \text{ g}$
- IV. Lagenzahl $n = 10$
- V. Dichte des Laminats $\rho = 0,608 \cdot 10^{-3} \text{ g/mm}^3$

$$\frac{X}{\frac{\text{Gesamtflächengewicht}}{\text{Dichte}}} = \frac{100\%}{\text{Dicke}}$$

$$V_f = \frac{100\% \cdot \frac{\text{Gesamtflächengewicht}}{\text{Dichte}}}{\text{Dicke}}$$

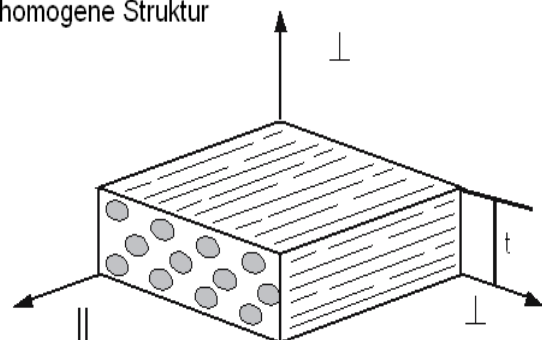
$$V_f = \frac{100\% \cdot \frac{\text{Gesamtflächengewicht}}{\text{Dichte}} \cdot \text{Lagenzahl}}{\text{Dicke}}$$

$$V_f = \frac{100\% \cdot \frac{\text{Gesamtflächengewicht}}{\text{Dichte}} \cdot n}{t}$$

$$V_f = \frac{100\% \cdot \frac{155 \cdot 10^{-6}}{0,608 \cdot 10^{-3}} \cdot 10}{3,2}$$

$$V_f = 79,66 \%$$

homogene Struktur



Anhang

8.3 3-Punkt-Biegeversuch-Werte

RF-Aerogel:

Drei-Punkt-Biegung ohne Schubeinfluss

Probenname (10 Lagig)	Dicke t [mm]	Breite b [mm]	Auflager- abstand L _{Auflagerab.3} [mm]	Kraft F ₃ [N]	Absenkung w ₃ [mm]	Biegesteifigkeit B [Nmm]	Elastizitäts- modul E [MPa]
UPE01	14,1	14,1	45	20	0,122	22072	94,4868
UPE02	14,1	14,1	45	20	0,11	24480	104,794
UPE03	14,1	13,9	45	20	0,22	12416,20	53,151

Hanffaserverbund:

Drei-Punkt-Biegung ohne Schubeinfluss

Probenname (10 Lagig)	Dicke t [mm]	Breite b [mm]	Auflager- abstand L _{Auflagerab.3} [mm]	Kraft F ₃ [N]	Absenkung w ₃ [mm]	Biegesteifigkeit B [Nmm]	Elastizitäts- modul E [MPa]
UPH01	4	10,5	80	10	1,9	5346,7	1002,506
UPH02	4,5	10,5	80	10	2,11	4814,56	634,01

Drei-Punkt-Biegung mit Schubeinfluss

Probenname (10 Lagig)	l _{Aufl.1} [mm]	F ₁ [N]	w ₁ [mm]	l _{Aufl.2} [mm]	F ₂ [N]	w ₂ [mm]	l _{Aufl.3} [mm]	F ₃ [N]	w ₃ [mm]	B [Nmm]	G [MPa] Diagramm	E [MPa] Diagramm
UPH01	40	20	0,88	60	15	1,41	80	10	1,90	4263,99	9,82	1666,67
UPH02	40	20	0,64	60	15	1,23	80	10	2,11	4669,76	61,53	642

Anhang

Jutefaserverbund:

Drei-Punkt-Biegung ohne Schubeinfluss

Probenname (10 Lagig)	Dicke t [mm]	Breite b [mm]	Auflager- abstand Auflagerab.3 [mm]	Kraft F ₃ [N] Konst.	Absenkung w ₃ [mm]	Biegesteifigkeit B [Nmm]	Elastizitäts- Modul E [MPa]
UPJ01	8	20,2	80	10	0,45	11734,5	275
UPJ02	9	19,8	80	10	0,52	10360,01	170
UPJ03	8,2	20	80	10	0,33	16161,61	351,74

Drei-Punkt-Biegung mit Schubeinfluss

Probenname (10 Lagig)	Aufl.1 [mm]	F1 [N]	w1 [mm]	Aufl.2 [mm]	F2 [N]	w2 [mm]	Aufl.3 [mm]	F3 [N]	w3 [mm]	B [Nmm]	G [MPa] Diagramm	E [MPa] Diagramm
UPJ01	40	30	0,53	60	20	0,44	80	10	0,45	8532	15,2	357
UPJ02	40	30	0,51	60	20	0,54	80	10	0,52	7579	5,326	357
UPJ03	40	30	0,37	60	20	0,37	80	10	0,33	16630	10,52	625

Baumwollfaserverbund:

Drei-Punkt-Biegung ohne Schubeinfluss

Probenname (10 Lagig)	Dicke t [mm]	Breite b [mm]	Auflager- abstand Auflagerab.3 [mm].	Kraft F ₃ [N]	Absenkung w ₃ [mm]	Biegesteifigkeit B [Nmm]	Elastizitäts- modul E [MPa]
UPB01	4	19,2	80	5	1,71	1624,431	304,58
UPB03	4	19,2	80	5	1,023	2715,32	509,123

Anhang

Drei-Punkt-Biegung mit Schubeinfluss

Probenname (10 Lagig)	lAufl.1 [mm]	F1 [N]	w1 [mm]	lAufl.2 [mm]	F2 [N]	w2 [mm]	lAufl.3 [mm]	F3 [N]	w3 [mm]	B [Nmm]	G [MPa] Diagramm	E [MPa] Diagramm
UPB01	40	15	1,47	60	10	1,91	80	5	1,71	1186,71	2,14	526
UPB03	40	15	0,65	60	10	1,38	80	5	1,023	2005	5,5	714,28

Aramidfaserverbund:

Drei-Punkt-Biegung ohne Schubeinfluss

Probenname	Dicke t [mm]	Breite b [mm]	Auflager- abstand lAuflagerab.3 [mm]	Kraft F ₃ [N]	Absenkung w ₃ [mm]	Biegesteifigkeit B [Nmm]	Elastizitäts- modul E [MPa]
UPZ01	2,9	27	80	10	0,20	19753	9719
UPZ02	2,9	28	80	10	0,215	17719	8718
UPZ03	2,9	28,5	80	10	0,239	15660	7705

Drei-Punkt-Biegung mit Schubeinfluss

Probenname	lAufl.1 [mm]	F1 [N]	w1 [mm]	lAufl.2 [mm]	F2 [N]	w2 [mm]	lAufl.3 [mm]	F3 [N]	w3 [mm]	B [Nmm]	G [MPa] Diagramm	E [MPa] Diagramm
UPZ01	40	30	0,32	60	20	0,244	80	10	0,20	12681	X	X
UPZ02	40	30	0,292	60	20	0,24	80	10	0,215	12001	X	X
UPZ03	40	30	0,285	60	20	0,21	80	10	0,239	11873	X	X

Anhang

Kohlefaserverbund:

Drei-Punkt-Biegung ohne Schubeinfluss

Probenname (10 Lagig)	Dicke t [mm]	Breite b [mm]	Auflager- abstand l _{Auflagerab.3} [mm]	Kraft F ₃ [N]	Absenkung w ₃ [mm]	Biegesteifigkeit B [Nmm]	Elastizitäts- modul E [MPa]
UPC01	5	19,5	80	20	0,20	54700,85	5251,28
UPC02	4,9	20	80	20	0,27	39506,17	4029,56
UPC03	4,2	19,2	80	20	0,39	28490,03	4614,52

Drei-Punkt-Biegung mit Schubeinfluss

Probenname (10 Lagig)	l _{Aufl.1} [mm]	F ₁ [N]	w ₁ [mm]	l _{Aufl.2} [mm]	F ₂ [N]	w ₂ [mm]	l _{Aufl.3} [mm]	F ₃ [N]	w ₃ [mm]	B [Nmm]	G [MPa] Diagramm	E [MPa] Diagramm
UPC01	40	40	0,29	60	30	0,27	80	20	0,20	29924	X	X
UPC02	40	40	0,28	60	30	0,29	80	20	0,27	24101	X	X
UPC03	40	40	0,34	60	30	0,29	80	20	0,39	20301	68	5000

8.3.1 Biegebruchversuch

Probenname (10 Lagig)	Dicke t [mm]	Breite b [mm]	Auflager- abstand l _{Auflagerab.3} [mm]	Kraft F _{max} [N]	Bruchmoment m [Nmm/mm]	Biegebruchspannung σ_B [MPa]
UPE Probe (RF-Aerogel)	14,1	14,1	40	150,82	106,86	6,4562
UPB Probe (Baumwolle)	4	19	60	14,686	11,5942	4,3478
UPC (Kohlefaser)	4	18	60	47	39,167	16,688
UPZ (Aramid)	2,9	27,5	60	43,7	23,84	11,3367

Anhang

8.4 Zugversuche

1. t-dicke und b-breite der Probe bestimmen.
2. Länge des Messbereichs auf 50 mm festgelegt.
3. Die Kraft so lange erhöht bis die Probe reißt.
4. Verformungsweg w dabei notiert.
5. Diesen Versuch mit nahezu zwei geometrisch identischen Proben wiederholt.

Hanffaserverbund:

Probenname (10 Lagig)	t [mm]	b [mm]	l ₀ [mm]	$\Delta\epsilon$ [-]	ΔF [kN]	D [N/mm]	E _z [MPa]	ρ [g/cm ³]	V _f [%]
ZBH01	4	18	50	0,00296386	0,163959	3073,30	768,32	0,90	77
ZBH02	5	18	50	0,00187730	0,1117	3305,575	661,10	0,90	77

Zugbruchversuch

Probenname (10 Lagig)	t [mm]	b [mm]	F _{max} [N]	n [N/mm]	σ_{zB} [MPa]
ZBH01	4	18	1740	96,67	24,166
ZBH02	5	18	1690	93,89	18,8

Jutefaserverbund:

Probenname (10 Lagig)	t [mm]	b [mm]	l ₀ [mm]	$\Delta\epsilon$ [-]	ΔF [kN]	D [N/mm]	E _z [MPa]	ρ [g/cm ³]	V _f [%]
ZBJ01	9,9	21	50	0,00215	0,205517	4551,87	459,73	0,72	68

Zugbruchversuch

Probenname (10 Lagig)	t [mm]	b [mm]	F _{max} [kN]	n [N/mm]	σ_{zB} [MPa]
ZBJ01	9,9	21	1,75	83,33	8,42

Anhang

Baumwollfaserverbund:

Probenname (10 Lagig)	t [mm]	b [mm]	l ₀ [mm]	$\Delta\varepsilon$ [-]	ΔF [kN]	D [N/mm]	E _z [MPa]	ρ [g/cm ³]	V _f [%]
ZBB01	3,2	24	50	0,0035	0,1529	1820,23	568,73	0,61	80
ZBB02	2,7	21	50	0,00404	0,15106	1780,52	643,3	0,61	80
ZBB03	3,2	21,5	50	0,0035011	0,159527	2118,69	662	0,61	80

Zugbruchversuch

Probenname (10 Lagig)	t [mm]	b [mm]	F _{max} [N]	n [N/mm]	σ_{zB} [MPa]
ZBB01	3,2	24	1097	45,7	14,283
ZBB02	2,7	21	900	42,9	15,87
ZBB03	3,2	21,5	1242	57,8	18,05

Aramidfaserverbund:

Probenname (10 Lagig)	t [mm]	b [mm]	l ₀ [mm]	$\Delta\varepsilon$ [-]	ΔF [kN]	D [N/mm]	E _z [MPa]	ρ [g/cm ³]	V _f [%]
UPA02	2,7	20	50	0,029558	11,93694	20180,66	7478,75	0,74	82
UPA03	2,7	20	50	0,023222	15,07717	32462,75	12023,54	0,74	82

Zugbruchversuch

Probenname (10 Lagig)	t [mm]	b [mm]	F _{max} [kN]	n [N/mm]	σ_{zB} [MPa]
UPA02	2,7	20	18,02	901	333,7
UPA03	2,7	20	21,78	1089	403,3

Anhang

Kohlefaserverbund:

Probenname (10 Lagig)	t [mm]	b [mm]	l ₀ [mm]	$\Delta\epsilon$ [-]	ΔF [kN]	D [N/mm]	E _z [MPa]	ρ [g/cm ³]	V _f [%]
ZBC01	3,9	19,8	50	0,013788	16,2736	59609,73	15280	1,16	80
ZBC02	4,2	21,2	50	0,01166	15,712	63561	15130	1,16	80

Zugbruchversuch

Probenname (10 Lagig)	t [mm]	b [mm]	F _{max} [kN]	n [N/mm]	σ_{zB} [MPa]
ZBC01	3,9	19,8	19,16	967,68	248,12
ZBC02	4,2	21,2	20,23	1000	238,09

Anhang

8.5 Verwendete synthetische Fasern

Aramidgewebe 61 g/m ²	Gewaschene Qualität
Fadenzahl Fd/cm (DIN 53 853) Kette X Schuss	13.5 X 13.5
Garntyp (DIN 60 805) Kette X Schuss	Aramid HM 22 tex X Aramid HM 22 tex
Bindung	Leinwand
Dicke <u>Trockengewebe (DIN 53855):</u> Laminat 43% Faservol.	<u>0.10</u> 0.07
Feuchtegehalt ¹ (DIN 53 800)%	3 max
Faserquerschnitt der Gewebelage mm ² /m	<u>Kette: 20.5</u> Schuss: 20.5
Zugfestigkeit ² MPa (DIN EN 61)	<u>Kette: 400</u> Schuss: 350
Zug-E-modul ² GPa (DIN EN 61)	<u>Kette: 23</u> Schuss: 20
Druckfestigkeit ² MPa (DIN 53 454)	<u>Kette: 120</u> Schuss: ---
Dichte g/cm ²	1.45
Elastizitätsmodul GPa	100
Elastizitätsmodul ⊥ GPa	5.4
Bruchdehnung %	2.8
Wärmeausdehnungskoeffizient 10 ⁻⁶ K ⁻¹	-3.5
Wärmeausdehnungskoeffizient ⊥ 10 ⁻⁶ K ⁻¹	17
Wärmeleitfähigkeit W/m·K	0.04
Spez. elektrischer Widerstand Ω·cm	10 ¹⁵
Feuchtigkeitsaufnahme 20°C/65 % rel. Luftfeuchtigkeit %	3.5
Reißlänge km	180-240

² Laminatwert mit EP-Harz(WL 5.3200 Teil 1+2), 43+/- 2% Faservolumenanteil

Anhang

Aramidgewebe 225 g/m ²	Gewaschene Qualität
Fadenzahl Fd/cm (DIN 53 853) Kette X Schuss	7 X 7
Garntyp (DIN 60 805) Kette X Schuss	Aramid HM 158 tex X Aramid HM 158 tex
Bindung	Köper
Dicke <u>Trockengewebe (DIN 53855):</u> Laminat 43% Faservol.	<u>0.38</u> 0.34
Feuchtegehalt ¹ (DIN 53 800)%	3 max
Faserquerschnitt der Gewebelage mm ² /m	Kette: 36,4 Schuss: 36,4
Zugfestigkeit ² MPa (DIN EN 61)	Kette: 410 Schuss: 360
Zug-E-modul ² GPa (DIN EN 61)	Kette: 23 Schuss: 20
Druckfestigkeit ² MPa (DIN 53 454)	Kette: 120 Schuss: ---
Dichte g/cm ³	1.45
Elastizitätsmodul GPa	100
Elastizitätsmodul ⊥ GPa	5.4
Bruchdehnung %	2.8
Wärmeausdehnungskoeffizient 10 ⁻⁶ K ⁻¹	-3.5
Wärmeausdehnungskoeffizient ⊥ 10 ⁻⁶ K ⁻¹	17
Wärmeleitfähigkeit W/m·K	0.04
Spez. elektrischer Widerstand Ω cm	10 ¹⁵
Feuchtigkeitsaufnahme 20°C/65 % rel. Luftfeuchtigkeit %	3.5
Reißlänge km	180-240

² Laminatwert mit EP-Harz(WL 5.3200 Teil 1+2),43 +/- 2% Faservolumenanteil

Anhang

Kohlegewebe 410 g/m ²	Gewaschene Qualität
Fadenzahl Fd/cm (DIN 53 853) Kette X Schuss	5 X 5
Garntyp (DIN 60 805) Kette X Schuss	400 tex X 400 tex
Bindung	Köper 2/2
Dicke <u>Trockengewebe (DIN 53855):</u> Laminat 43% Faservol.	<u>0.60</u> 0.54
Faserquerschnitt ¹ der Gewebelage mm ² /m	Kette: 124 Schuss: 124
Zugfestigkeit ² MPa (DIN EN 61)	Kette: 600 Schuss: 660
Zug-E-modul ² GPa (DIN EN 61)	Kette: 55 Schuss: 55
Druckfestigkeit ² MPa (DIN 53 454)	Kette: 460 Schuss: 460
Dichte g/cm ³	1.5
Elastizitätsmodul GPa	235
Elastizitätsmodul ⊥ GPa	15
Bruchdehnung %	1,4
Wärmeausdehnungskoeffizient 10 ⁻⁶ K ⁻¹	-0,1
Wärmeausdehnungskoeffizient ⊥ 10 ⁻⁶ K ⁻¹	10
Wärmeleitfähigkeit W/m·K	17
Spez. elektrischer Widerstand Ω·cm	10 ⁻³ -10 ⁻⁴
Feuchtigkeitsaufnahme 20°C/65 % rel. Luftfeuchtigkeit %	0,1
Reißlänge km	60

² Laminatwert mit EP-Harz(WL 5.3200 Teil 1+2), 43+/- 2% Faservolumenanteil

Anhang

8.6 Identifikation:

8.6.1 Natriumcarbonat

Kohlensaures Natrium(Soda)

Aggregatzustand: fest
Bei 1013mbar / 20°C
Schmelzpunkt: 851°C
Molmasse: 105,99 g/mol
Dichte: 2,5 g/cm³

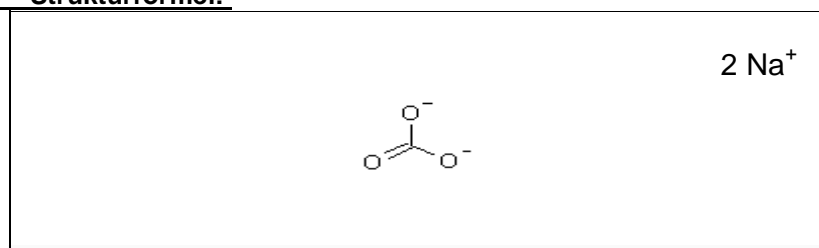
Gefahren:
Reizt die Augen
Summenformel:
Na₂CO₃

Form: griesartiges Pulver
Farbe: weiss
Geruch: geruchlos

Charakterisierung:
Nicht brennbar Feststoff.
Leicht löslich in Wasser.

Hygroskopisch
(zieht bei längerer Lagerung an der Luft Feuchtigkeit an)
Wässrige Lösung reagiert stark alkalisch.
Von dem Stoff gehen akute oder chronische Gesundheitsgefahren aus.

Strukturformel:



Gefahrenzeichen:



Xi
Reizend

8.6.2 Formaldehyd

Formalin
Methanal

Aggregatzustand: flüssig
Bei 1013mbar/20°C
Formaldehydlösungen

Aggregatzustand: gasförmig
Bei 1013mbar/20°C
In reinem wasserfreiem Zustand.

Schmelzpunkt: -92°C
Siedepunkt: -21°C
Molmasse: 30,03 g/mol
Dichte: 0,82 g/cm³ (bei 20°C)
Form: Gas, handelsüblich als wässrige Lösung
Farbe: Farblos
Geruch: stechend

Charakterisierung:
Hochentzündliches Gas.
Bildet mit Luft explosionsfähiges Gemisch.
Leicht löslich in Wasser.
Sehr leicht flüchtig.
Gas ist nur wenig schwerer als Luft.
Wässrige Formaldehyd-Lösungen haben bei Raumtemperatur einen merklichen Formaldehyd-Dampfdruck.
Wegen der sehr niedrigen Geruchsschwelle können selbst kleinste Konzentrationen wahrgenommen werden.
Formaldehyd neigt in wässriger Lösung leicht zur Bildung polymerer Formen. Dämpfe aus konzentrierter oder erwärmter Lösung sind unter bestimmten Bedingungen leicht entzündlich und können mit Luft explosionsfähige Gemische bilden.
Von dem Stoff gehen akute oder chronische Gesundheitsgefahren aus.

Anhang

Gefahren:



Giftig

Summenformel:

CH₂O

Strukturformel:

Gefahrenzeichen:

<p>Formaldehyd</p>  <p>Molmasse: 30,03 Summenformel: CH₂O</p>	 <p>Giftig</p>
---	---

8.6.3 Resorcin

Resorcinol
meta-Dihydroxybenzol

Aggregatzustand: fest

Bei 1013 mbar/20°C

Molmasse: 110,11 g/mol

Dichte: 1,27 g/cm³

Form: Pulver

Farbe: weiß

Geruch: unangenehm

Charakterisierung:

Brennbarer Feststoff.

Sehr leicht löslich in Wasser.

Von dem Stoff gehen akute oder chronische Gesundheitsgefahren aus.

Der Stoff ist umweltgefährlich.

Bei 20 °C lösen sich in 100 Gramm

Wasser 123 Gramm Resorcin.

Gefahren:

Reizt die Augen und die Haut.

Summenformel:

C₆H₆O₂

Strukturformel:

Gefahrenzeichen:

	 <p>XI reizend</p>	 <p>Umweltgefährlich</p>
---	---	---

8.6.4 Wasser

Wasserstoffoxid

Aggregatzustand: flüssig

Bei 1013mbar/20°C

Aggregatzustand: fest

Bei 1013 mbar/ < 0°C

Aggregatzustand: Gas

Bei 1013mbar/ > 100°C

Schmelzpunkt: 0°C

Bei 1013 mbar

Siedepunkt: 100°C

Bei 1013 mbar

Summenformel:

H₂O

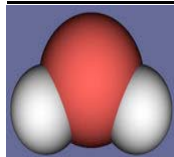
Molmasse: 18 g/mol

Dichte: 1g/cm³

Farbe: transparent

Geruch: geruchlos

Strukturformel:



Danksagung

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit und dem sehr angenehmen Arbeitsumfeld beigetragen haben.

Herrn Prof. Dr. L. Ratke gilt mein besonderer Dank für die Vergabe dieser Arbeit, die Unterstützung und die vielen Anregungen.

Herrn Prof. Dr. W. Ley möchte ich für die Betreuung seitens der FH-Aachen danken.

Frau Dr. S. Brück und Frau Dr. B. Milow danke ich für die zahlreichen fachlichen Diskussionen.

Bei Herrn Dipl.-Ing. K. H. Trautmann und Herrn U. Fuchs bedanke ich mich für die Mithilfe bei Messungen.

Herrn Dipl.-Ing. U. Pohl gebührt mein Dank für die gute Zusammenarbeit und die stete Diskussionsbereitschaft.

Außerdem sei allen Mitarbeitern des Instituts für Raumsimulation des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Köln, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, gedankt.

Meinen Eltern, die mir all dies ermöglicht haben.

